

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

В.А. Целищев

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Конспект лекций

Иркутск 2015

УДК 519.873
ББК 22.18
Ц 34

Рекомендовано к изданию редакционным советом ИрГУПС

Составитель:

В.А. Целищев, доцент

Рецензенты:

Д.В. Андронов, зам. начальника службы АТ ВСЖД – филиала ОАО «РЖД»;

М.И. Лайков, к. т. н, доцент, Иркутский филиал МГТУ ГА

Целищев В.А.

Ц 34

Основы теории надежности [Электронный ресурс]: конспект лекций для студентов специальности «Системы обеспечения движения поездов» дневной и заочной форм обучения / В.А. Целищев. – Иркутск, 2015. – 148 с.

Рассматриваются основные понятия теории надежности, качественные и количественные характеристики надежности. Рассмотрены математические основы теории надежности, расчеты показателей надежности.

Конспект может быть использован как для практического закрепления теоретического материала по курсу «Основы теории надежности» студентами дневной формы обучения, так и при самостоятельной подготовке студентов заочной и дистанционной форм обучения.

УДК 519.873
ББК 22.18

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
<u>Лекция 1</u>	
1.1. Общие сведения	8
1.2. Основные понятия теории надежности	10
1.3. Классификация и причины возникновения отказов	12
1.4. Показатели надежности невосстанавливаемых объектов	14
<u>Лекция 2</u>	
2.1. Понятие о структурной схеме надежности	19
2.2. Объекты с последовательным соединением элементов	21
2.3. Объекты с параллельным соединением элементов	22
2.4. Объекты со смешанным соединением элементов	24
2.5. Объекты с произвольным соединением элементов	25
2.5.1. Логико-вероятностный метод	25
2.5.2. Методы минимальных путей и минимальных сечений	26
2.5.3. Метод преобразования соединения «треугольник» в соединение «звезда»	27
2.5.4. Метод разложения структуры по «ключевым элементам» ..	28
<u>Лекция 3</u>	
3.1. Понятие о потоке отказов и восстановлений	30
3.2. Показатели надежности восстанавливаемых объектов	31
3.3. Показатели ремонтпригодности	33
3.4. Комплексные показатели надежности объектов	35
<u>Лекция 4</u>	
4.1. Методы резервирования	38
4.2. Надежность невосстанавливаемых резервированных объектов	40
4.2.1. Общее горячее резервирование с целой кратностью	40
4.2.2. Раздельное горячее резервирование с целой кратностью	42
4.2.3. Общее горячее резервирование с дробной кратностью (мажоритарное резервирование)	43
4.2.4. Общее холодное резервирование с целой кратностью	44
4.2.5. Раздельное холодное резервирование с целой кратностью ..	45
4.2.6. Скользящее резервирование	46
<u>Лекция 5</u>	
5.1. Понятие о Марковских процессах	48
5.2. Понятие о графе состояний объектов	50
5.3. Марковский случайный процесс с дискретными состояниями и дискретным временем (цепь Маркова)	51
5.4. Марковский случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем (дискретный процесс)	53

Лекция 6

- 6.1. Марковские процессы в расчетах надежности нерезервированных восстанавливаемых объектов 55

Лекция 7

- 7.1. Марковские процессы в расчетах надежности резервированных восстанавливаемых объектов 60
- 7.1.1. Общее горячее резервирование 60
- 7.1.2. Общее холодное резервирование 62

Лекция 8

- 8.1. Законы распределения показателей надежности 65
- 8.2. Определение вида и параметров закона распределения показателей надежности 69

Лекция 9

- 9.1. Показатели долговечности 72
- 9.2. Показатели сохраняемости 73
- 9.3. Экономические показатели надежности 74
- 9.4. Параметрическая надежность объектов 76

Лекция 10

- 10.1. Испытания на надежность 79
- 10.2. Определительные испытания на надежность 79
- 10.3. Контрольные испытания на надежность 82
- 10.3.1. Испытания, основанные на числе допустимых отказов равных нулю 82
- 10.3.2. Испытания, основанные на последовательном анализе 83
- 10.4. Ускоренные испытания 85

Лекция № 11

- 11.1. Надежность программного обеспечения 86
- 11.2. Показатели надежности программного обеспечения 87
- 11.3. Модели надежности программного обеспечения 88
- 11.3.1. Модель с дискретно-понижающей частотой появления ошибок 88
- 11.3.2. Модель с дискретным увеличением времени наработки на отказ 88
- 11.3.3. Экспоненциальная модель надежности 89
- 11.4. Принципы разработки надежного программного обеспечения ... 91
- 11.5. Расчет надежности с учетом надежности программ 91

Лекция 12

- 12.1. Понятие о безопасности технических объектов 93
- 12.2. Понятие о защитном и опасном отказе 93
- 12.3. Показатели безопасности 94
- 12.4. Ошибки человека и безопасность объектов 96
- 12.5. Контроль показателей надежности по данным эксплуатации 97

<u>Лекция 13</u>	
13.1. Система автоматического учета КАСАНТ	98
13.2. Система УРРАН	101
<u>Лекция 14</u>	
14.1. Факторы, влияющие на надежность объектов	109
14.2. Учет условий эксплуатации при расчетах надежности	110
14.3. Влияние периодичности и объема профилактических мероприятий на надежность	111
14.4. Выбор показателей надежности в зависимости от класса, группы надежности и режима эксплуатации	114
<u>Лекция 15</u>	
15.1. Обеспечение рационального состава запасных элементов как способ повышения надежности	116
<u>Лекция 16</u>	
16.1. Методы повышения надежности объектов	120
16.2. Резервирование как метод повышения надежности	123
16.3. Способы уменьшения интенсивности отказов	124
16.4. Сокращение времени непрерывной работы и восстановления ..	125
<u>Лекция № 17</u>	
17.1. Методы моделирования надежности	127
17.2. Дискретные модели надежности	128
17.3. Непрерывные модели надежности	129
17.4. Статистическое моделирование надежности	132
<u>Лекция № 18</u>	
18.1. Надежность напольных устройств и аппаратуры ЖАТ.....	134
Библиографический список	146

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение техники в производственных процессах сделало актуальным вопрос о ее эффективности. Эффективность использования техники связана с ее способностью непрерывно, качественно, безопасно выполнять возложенные функции. Однако из-за повреждений, дефектов и отказов снижается качество работы, возникают вынужденные простои и потребность в ремонте для восстановления работоспособности и требуемых технических характеристик.

Перечисленные обстоятельства привели к появлению понятия надежности технических средств и систем. Понятие надежности связано со способностью технического средства выполнять возложенные на него функции в течение требуемого времени и с требуемым качеством. С первых шагов развития технических средств и систем стояла задача сделать их такими, чтобы они работали надежно. С развитием и усложнением техники усложнялась и развивалась проблема ее надежности. Для решения ее потребовалась разработка научных основ направления – науки о надежности.

Предмет исследования науки о надежности – изучение причин, вызывающих отказы объектов, определение закономерностей, которым они подчиняются, разработка способов количественного измерения надежности, методов расчета и испытаний, разработка путей, методов и средств повышения надежности.

Целями освоения учебной дисциплины «Основы теории надежности» являются формирование знаний решения проблем оценки и повышения надежности при изучении систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Задачами освоения учебной дисциплины являются изучение основных понятий и математических методов основ теории надежности элементов и систем, овладение методами расчета надежности технических систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

Учебная дисциплина входит в базовую часть математического и естественнонаучного цикла. Необходимыми условиями для освоения дисциплины являются знания и умения решения алгебраических и дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, знания основ физических процессов старения и износа, умение применять методы аналитического, математического, имитационного и статистического моделирования. Для этого необходимо владение компетенциями ОК-1, ОК-2, ОК-7, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-12, ПК-26.

Дисциплина «Основы теории надежности» является логическим продолжением содержания дисциплин «Математика», «Физика», «Теория дискретных устройств» и служит основой для освоения дисциплин «Микропроцессорные информационно-управляющие системы», «Организация производства и менеджмент».

Процесс освоения дисциплины «Основы теории надежности» направлен на формирование компетенций ПК-3, ПК-18.

В результате освоения дисциплины обучаемые должны:

знать:

- основы и основные положения теории надежности;
- проблемы надежности и безопасности;

уметь:

– применять методы математического анализа в оценке надежности и безопасности систем;

– применять методы обеспечения безопасности систем;

– обрабатывать и представлять результаты расчетов показателей надежности;

владеть:

– математическими методами расчета показателей надежности;

– методами расчета надежности технических систем в профессиональной деятельности.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы или 144 часа. Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий и самостоятельной работы студента представлена в таблице 1.

Таблица 1

Виды аудиторных занятий и самостоятельной работы студента	Трудоемкость в часах
Аудиторные занятия, в т. ч.	54
лекции	36
практические занятия	18
Самостоятельная работа студента, в т. ч.	54
проработка материала лекций	12
подготовка к практическим занятиям	6
выполнение курсовой работы	36
Подготовка к промежуточной аттестации – экзамену	36
Итого	144

Лекция 1

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Надежность техники всегда была одной из основных проблем в ее развитии и совершенствовании. Надежности во все времена уделялось большое внимание. Об этом свидетельствует отрывок из Указа царя Петра I, относящийся к проблеме обеспечения надежности, в частности надежности вооружения армии: *«...Повелеваю хозяина Тульской ружейной фабрики Корнилу Белоглаза бить кнутом и сослать в работу в монастыри, понеже он, подлец, осмелился войску государеву продавать негодные пищали и фузеи. Старшину олдермана Фрола Фукса бить кнутом и сослать в Азов, пусть не ставит клейма на плохие ружья.*

Приказываю ружейной канцелярии из Петербурга переехать в Тулу и денно и нощно блюсти исправность ружей. Пусть дьяки и подьячие смотрят, как олдерман клейма ставит, буде сомнение возьмет, самим проверять и смотром и стрельбою. А два ружья каждый месяц стрелять пока не испортятся.

Буде заминка в войсках приключится, особливо при сражении, по недогляду дьяков и подьячих, бить оных кнутами нещадно по оголенному месту:

- хозяина – 25 кнутов и пени по червонцу за ружье;*
- старшего олдермана – бить до бесчувствия;*
- старшего дьяка – отдать в унтер-офицеры;*
- дьяка – отдать в писаря;*
- подьячего – лишить воскресной водки сроком на один год.*

Хозяину ружейной фабрики Демидову повелеваю построить дьякам и подьячим избы, дабы не хуже хозяйской были. Буде хуже, пусть Демидов не обижается, повелю живота лишить».

Стоит обратить внимание на то, что в Указе Петра отражены многие способы контроля и повышения надежности изделий, применяемые и сегодня: контрольные испытания, непримиримость ОТК, контроль за контролерами, суперсовременные ускоренные испытания, а также уровень наказаний за ненадлежащее исполнение обязанностей.

За последние 50–60 лет проблема надежности значительно обострилась. Это обусловлено следующими основными причинами:

– **Увеличилась сложность техники.** Современные технические системы могут иметь в своем составе до 10^4 – 10^6 и более элементов. Усложнение техники закономерно приводит к снижению ее надежности.

– **Усилилась интенсивность режимов работы.** Режимы работы характеризуются высокими и сверхвысокими скоростями, температурами и давлениями.

– **Усложнились условия эксплуатации.** Изменение температуры,

влажности, вибраций, линейных ускорений и динамических нагрузок в широком диапазоне приводят к значительному снижению уровня надежности.

- *Повысились требования к качеству, точности и долговечности.*
- *Усилилась ответственность за выполняемые функции.*
- *Получила широкое внедрение автоматизация процессов производства и управления.*

Основная задача теории надежности – выбор оптимальных технических решений, обеспечивающих сохранение основных характеристик технических объектов и их элементов в течение некоторого времени в определенных условиях эксплуатации.

Одним из основных свойств любой технической системы является ее качество – совокупность характеристик, определяющих ее пригодность удовлетворять требования в соответствии с назначением.

Качество технического объекта – комплексное свойство, включающее в себя:

- Показатели назначения – характеризуют свойства, определяющие область применения и функциональное предназначение.
- Показатели надежности – характеризуют способность объекта выполнять свои функции в определенных условиях эксплуатации в течение определенного времени.
- Эргономические показатели – характеризуют удобство использования и обслуживания.
- Эстетические показатели – характеризуют выразительность, рациональность форм, целостность композиции, стабильность товарного вида.
- Показатели технологичности – характеризуют удобство и простоту изготовления и эксплуатации объекта.
- Показатели транспортабельности – характеризуют приспособленность объекта к перемещению.
- Показатели унификации и стандартизации – характеризуют насыщенность объекта стандартными, унифицированными, оригинальными элементами.
- Патентно-правовые показатели – характеризуют степень обновления технических решений, патентную защиту, возможность реализации объекта в России и за рубежом.
- Экологические показатели – характеризуют уровень вредного воздействия на окружающую среду.
- Показатели безопасности – характеризуют безопасность объекта по отношению к человеку.
- Показатели экономичности – характеризуют совершенство объекта по уровню потребления им ресурсов (сырья, топлива и т. д.).

1.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Основные термины, понятия и определения приведены в ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Термины и определения».

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

В определении имеются следующие особенности.

Во-первых, подчеркнута непрерывность выполнения объектом заданных функций. Нет смысла говорить о надежности объекта в период проведения на нем профилактических, ремонтных работ, замены изношенных элементов и других мероприятий с остановкой объекта. Объект в это время не выполняет заданных функций.

Во-вторых, в определение надежности включено понятие «установленные пределы». Сложная система при отказе отдельных элементов или подсистем может сохранить свою работоспособность и выполнить функциональное предназначение, но с меньшей эффективностью.

В-третьих, надежность объекта целесообразно определять за определенные промежутки времени или наработку. То есть за время до прекращения эксплуатации.

Надежность является сложным комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости или определенные сочетания этих свойств.

Безотказность – свойство объекта *непрерывно* сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Если нас интересуют возможность работы объекта до полного использования его технических возможностей, применяется понятие долговечности.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

После отказа работоспособность объекта, как правило, может быть восстановлена. Поэтому в характеристику надежности введено понятие, определяющее пригодность объекта к ремонту – ремонтпригодность.

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Изменение состояния объекта возможно не только во время его использования, но и при хранении на складе, при транспортировании и т. д. Есть случаи, когда после транспортирования объект либо вовсе теряет свою работоспособность, либо его показатели настолько снижаются, что

он практически становится не пригодным к эксплуатации. Это свойство объекта характеризуется свойством сохраняемости.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

В процессе применения, хранения, транспортирования, технического обслуживания и ремонта технический объект может находиться в одном из нескольких состояний.

Исправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправный объект, в свою очередь, может находиться в следующих состояниях – работоспособном, неработоспособном и предельном.

Работоспособное состояние – состояние объекта, у которого значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо приведение его в работоспособное состояние невозможно или нецелесообразно.

Дополнительно для систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) различают два вида неработоспособного состояния: защитное и опасное состояние.

Защитное состояние – неработоспособное состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции по обеспечению безопасности движения поездов, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Опасное состояние – неработоспособное состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего его способность выполнять заданные функции по обеспечению безопасности движения поездов, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Переход объекта из одного состояния в другое происходит вследствие возникновения дефекта, повреждений и отказов, восстановлений и ремонтов. Событие, заключающееся в нарушении исправности объекта, называ-

ется **дефектом**. Если объект переходит в неисправное, но работоспособное состояние, то такой дефект называют **повреждением**. Если объект переходит в неработоспособное или предельное состояние, то это событие называют **отказом**.

Обратный процесс называется процессом восстановления работоспособности. Если объект находится в неработоспособном состоянии, то производится его ремонт. Если объект находится в предельном состоянии, то производится его капитальный ремонт, состоящий в замене отдельных деталей и восстановлении его ресурса. Если ремонт экономически нецелесообразен, производится списание объекта.

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 объекты разделяются на невозстанавливаемые и восстанавливаемые.

Невосстанавливаемым называется объект, для которого в рассматриваемых условиях восстановление работоспособности не предусмотрено в нормативно-технической документации.

Восстанавливаемый объект – объект, для которого проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и конструкторской документации.

1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗОВ

Отказ – событие, которое заключается в нарушении работоспособного состояния объекта. **Отказ** – событие, после возникновения которого характеристики (параметры) технического объекта выходят за установленные пределы.

По характеру и скорости изменения параметров объекта до момента возникновения отказы делят на внезапные и постепенные.

Внезапные отказы характеризуются скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Причинами внезапных отказов могут быть как естественные постепенные изменения в физической структуре объекта, которые при определенных условиях приобретают лавинообразный характер, так и условия применения объекта. Внезапный отказ может наступить в любой момент времени. Предвидеть и предупредить его нельзя.

Постепенный отказ характеризуется постепенным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Постепенный отказ является следствием накопления сравнительно малых и медленных изменений свойств объекта, например, изнашивание поверхностей трения. Постепенные отказы можно предвидеть и даже избежать, своевременно заменяя изношенные объекты.

По типу отказы делят на:

– **отказы функционирования**, при которых прекращается выполнение объектом основных функций (например, поломка зубьев шестерни);

– **отказы параметрические**, при которых параметры объекта выходят за установленные пределы (потеря точности измерения напряжения вольтметром).

По наличию причинно-следственной связи отказы делят на:

- независимые;
- зависимые.

Независимый отказ – отказ объекта, возникающий в результате процессов, происходящих в его внутренней структуре, и не обусловлен возникновением отказов других объектов. **Зависимые отказы** являются следствием возникновения отказов других объектов.

По своей природе отказы могут быть:

– **случайные**, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала, сбоями системы управления и т. д.;

– **систематические**, обусловленные закономерными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений – усталость, износ, старение, коррозия и т. д.

По причине возникновения отказы могут быть:

- конструкционные;
- производственные;
- эксплуатационные.

Конструкционные отказы возникают в результате ошибок и нарушений правил и норм конструирования в период разработки объекта: недостаточной заданной прочности, неправильного выбора режима, неудачной компоновки объекта. **Производственные отказы** возникают в результате несовершенства процесса или нарушений технологии изготовления объектов. Часто к таким отказам приводит нарушение сортности материалов и других комплектующих объектов. **Эксплуатационные отказы** связаны с воздействием недопустимо больших нагрузок, высоких или низких температур, ударов, тряски и других воздействий, непредусмотренных режимами их эксплуатации.

По характеру проявления отказы делят на:

- явные;
- скрытые.

Явным называют отказ, который мгновенно проявляется при его возникновении. **Скрытым** называют отказ, который обнаруживается только при проведении профилактических работ.

По возможности последующего использования объекта:

- полные;
- частичные.

В случае полного отказа применение объекта до восстановления его работоспособного состояния невозможно. В случае частичного отказа применение объекта возможно, хотя значение одного или нескольких па-

раметров не будет соответствовать требованиям нормативно-технической документации.

По возможности устранения:

- устранимые;
- неустранимые.

При устранимом отказе возможно восстановление системы как в условиях эксплуатирующих подразделений, так и на ремонтных предприятиях. В случае неустранимого отказа система или изделие подлежит списанию и утилизации.

По последствиям:

- защитные;
- опасные.

Защитный отказ – это событие, которое заключается в нарушении работоспособного состояния системы при сохранении защитного состояния. Опасный отказ – это событие, которое заключается в нарушении работоспособного и защитного состояний.

1.4. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Показатель надежности – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

Показатель надежности количественно характеризует, в какой степени объекту присущи определенные свойства надежности. В зависимости от того, сколько свойств надежности характеризуют показатели, различают единичные и комплексные показатели надежности: единичные характеризуют одно из свойств, комплексные – не менее двух. При определении надежности объектов используют две формы представления показателей – вероятностную и статистическую. Вероятностная форма удобна для аналитических расчетов, статистическая – при проведении экспериментальных исследований и испытаний объектов на надежность.

Показателями надежности невосстанавливаемых объектов являются:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- вероятность отказа $Q(t)$;
- частота отказов $f(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя наработка до отказа T_0 (наработка до отказа).

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

В общем случае величина вероятности безотказной работы зависит от наработки объекта (времени эксплуатации). Под наработкой понимается продолжительность или объем работы объекта. Нарботка измеряется в единицах времени или единицах объема выполненной работы.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы может быть получена в результате испытаний на надежность.

Для испытания N объектов до отказа последнего объекта

$$P(t) = \frac{N(t)}{N} = \frac{N - n(t)}{N} = 1 - \frac{n(t)}{N},$$

где N – число объектов, поставленных на испытание; $N(t)$ – число работоспособных объектов на момент времени t , $n(t)$ – число объектов, отказавших за время t от начала испытаний.

Часто необходимо определять вероятность безотказной работы объекта в интервале времени (или наработки) от t_1 до t_2 , представляющую собой условную вероятность того, что объект не откажет в этом интервале, если он безотказно проработал до начала интервала.

Тогда статистическая оценка вероятности безотказной работы

$$P(t_1, t_2) = \frac{N(t_2)}{N(t_1)} = \frac{N - n(t_2)}{N - n(t_1)},$$

где $N(t_1)$, $N(t_2)$ – число работоспособных объектов, соответственно на начало и конец интервала времени, $n(t_1)$, $n(t_2)$ – число отказавших объектов, соответственно на начало и конец интервала времени.

Показатель «вероятность безотказной работы» имеет следующие достоинства:

- характеризует изменение надежности объекта во времени;
- является интервальной оценкой, то есть позволяет оценить безотказность объекта на любом выбранном интервале времени работы объекта;
- сравнительно просто оценивается по статистическим данным об отказах объектов.

Основной недостаток этого критерия – характеризует надежность объектов до первого отказа.

Вероятность отказа $Q(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки объект откажет хотя бы один раз.

Статистическая оценка вероятности отказа за время или наработку

$$Q(t) = \frac{N - N(t)}{N} = \frac{n(t)}{N}.$$

Работоспособное и неработоспособное состояния – противоположные несовместные состояния, образующие полную группу возможных состояний объекта, поэтому в любой момент времени или при любой наработке

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

Если $P(t = 0) = 1$, то $Q(t = 0) = 0$; если $P(t = \infty) = 0$, $Q(t = \infty) = 1$.

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа – безразмерные величины, выражаются в долях единицы, иногда в процентах.

Для описания мгновенных значений показателей надежности применяется дифференциальная функция – **частота отказов или плотность распределения наработки до отказа:**

$$f(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = \frac{d}{dt} \{1 - P(t)\} = -\frac{d}{dt} P(t).$$

Статистическая оценка частоты отказов $f(t)$ определяется отношением числа отказавших объектов в единицу времени к числу поставленных на испытание объектов при условии, что отказавшие объекты не заменяются новыми

$$f(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t},$$

где $n(\Delta t)$ – число отказов объектов за рассматриваемый промежуток времени Δt ; N – число объектов, поставленных на испытание.

Очень важной характеристикой безотказности невосстанавливаемых объектов является интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента времени отказ не возник.

Аналитически интенсивность отказов определяется как отношение частоты отказов к вероятности безотказной работы

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}.$$

Статистическая оценка интенсивности отказов

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t)\Delta t},$$

где $N(t) = [N(t_1) + N(t_2)]/2$ – среднее число работоспособных объектов в интервале времени Δt .

Опыт исследования технических систем показывает, что интенсивность отказов $\lambda(t)$ в течение времени изменяется так, как показано на рисунке 1.

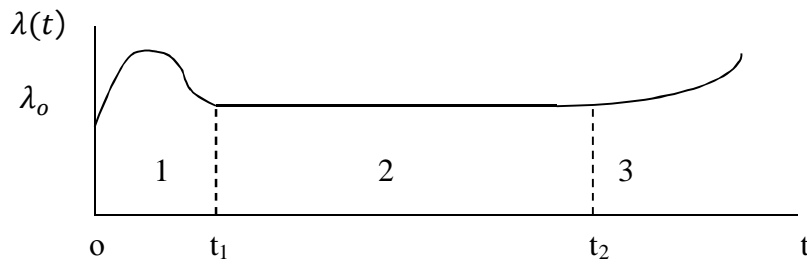


Рисунок 1

График функции $\lambda(t)$ условно можно разделить на три участка – период приработки, нормальной работы и деградации. На первом участке интенсивность отказов сначала растет, а затем уменьшается с течением времени. На этом участке выявляются скрытые дефекты производства и монтажа систем. Участок носит название участка приработки. Длительность его составляет от десятков часов до нескольких лет. Иногда с этим периодом связывают гарантийное обслуживание объекта, когда устранение отказов производится изготовителем. Второй участок считается периодом нормальной эксплуатации. Он характеризуется относительно постоянным значением интенсивности отказов. Здесь проявляются главным образом внезапные отказы, прежде всего из-за случайных изменений нагрузки, несоблюдения условий эксплуатации, неблагоприятных условий эксплуатации. Длительность участка составляет тысячи и десятки тысяч часов. На третьем участке проявляется усиление старения, износа элементов. Вследствие этого интенсивность отказов начинает возрастать. При достижении времени t_2 объект, как правило, должен сниматься с эксплуатации.

Наработка до отказа – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

Аналитически наработка до отказа определяется как:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки объекта до отказа:

$$M[T_0] = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot \frac{dQ(t)}{dt} dt.$$

Статистическая оценка средней наработки до отказа:

$$T_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi}$$

где N – число объектов, поставленных на испытание, t_{pi} – время работы i -го объекта до первого отказа.

На основе определения интенсивности отказов имеет место равенство:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{-\frac{d}{dt}P(t)}{P(t)}.$$

После интегрирования этого выражения получим:

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln P(t),$$

или

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Последнее уравнение – одно из основных в теории надежности. Из него следует, что вероятность безотказной работы представляет собой экспоненциальную монотонно убывающую функцию, которая в интервале времени или наработки от $t = 0$ до $t = \infty$ изменяется от 1 до 0 (рисунок 2). Соответственно, вероятность отказа меняется в том же интервале от 0 до 1. Такой закон получил название **экспоненциального закона** надежности.

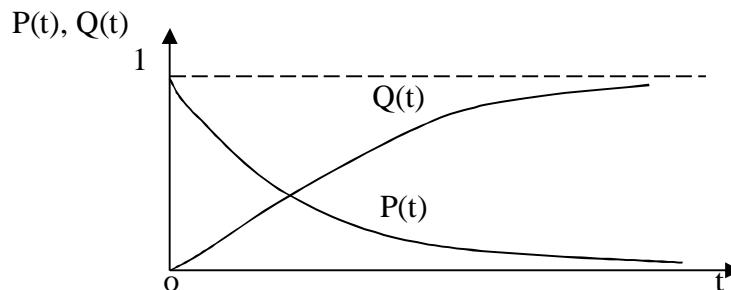


Рисунок 2

Если интенсивность отказов является величиной постоянной, то:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad T_0 = \frac{1}{\lambda}.$$

Лекция 2

2.1. ПОНЯТИЕ О СТРУКТУРНОЙ СХЕМЕ НАДЕЖНОСТИ

Все технические объекты состоят из элементов. Элементы физически могут быть соединены между собой самым различным образом. Для наглядного изображения соединений элементов используются различного рода схемы: структурные, функциональные, принципиальные и т. д. Каждая имеет свое предназначение и позволяет анализировать, как функционирует то или иное изделие.

Для анализа уровня надежности и расчета ее показателей применяются особые схемы, которые получили название структурных схем надежности.

Под структурной схемой надежности понимается наглядное графическое представление условий, при которых работает или не работает исследуемый элемент, объект, система, устройство и т. д.

Для составления структурной схемы надежности анализируют процесс функционирования объекта, изучают функциональные связи между элементами, виды отказов и причины их возникновения. Такое исследование требует высокой инженерной и математической эрудиции. Степень дробления объекта на элементы зависит от конкретной задачи расчетов.

Одно и то же соединение на принципиальной схеме может иметь совершенно другое соединение на структурной схеме надежности.

Основными отказами электрических объектов являются отказы типа «обрыв» и «короткое замыкание». Пусть объект состоит из двух диодов VD1 и VD2, физически соединенных параллельно. При отказе типа «короткое замыкание» схема выйдет из строя, когда откажет любой из двух диодов. Поэтому структурная схема надежности для этого случая изображается в виде последовательного соединения элементов. В другом случае, при отказе типа «обрыв», параллельная цепочка диодов откажет только в случае отказа двух диодов. Следовательно, структурная схема надежности будет представлять собой параллельное соединение элементов (рисунок 3).

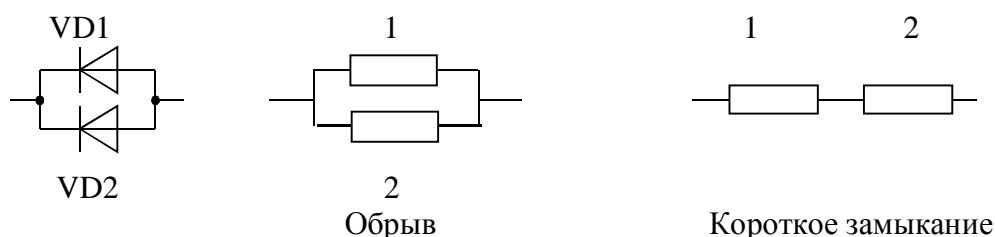


Рисунок 3

При определении структурной схемы надежности объекта оценивают влияние работоспособности каждого элемента на работоспособность объекта в целом. С этой точки зрения все элементы объекта делят на четыре группы:

1. Элементы, отказ которых практически не влияет на работоспособность объекта (например, деформация кожуха, изменение окраски поверхности и т. д.).

2. Элементы, работоспособность которых за рассматриваемый промежуток времени практически не изменяется и вероятность их безотказной работы близка к единице (станины, корпусные детали, малонагруженные элементы с большим запасом прочности и т. д.).

3. Элементы, ремонт или регулировка которых возможна в процессе работы или во время плановых остановок (наладка, замена режущего инструмента и т. д.).

4. Элементы, отказ которых сам по себе или в сочетании с отказами других элементов приводит к отказу системы.

При анализе надежности объекта в рассмотрение, как правило, включают элементы последней группы.

При анализе надежности объекта придерживаются следующего порядка:

1. Проводится анализ устройства и функциональная взаимосвязь составных частей, выполняемые функции объектом и его элементами.

2. Формулируется содержание понятий «безотказная работа» и «отказ».

3. Определяются все возможные отказы объекта и его составных частей, их причины и возможные последствия.

4. Оценивается влияние отказов составных частей на работоспособность объекта.

5. Объект разделяется на элементы, у которых показатели надежности известны.

6. Составляется структурная схема надежности системы.

7. По структурной схеме надежности составляются расчетные зависимости, по которым определяют величину показателей надежности объекта.

Расчет надежности проводится в предположении, что объект и каждый его элемент могут находиться в одном из двух возможных состояниях – работоспособном и неработоспособном. Отказы элементов независимы друг от друга.

Для расчета показателей надежности сложных объектов используют методы, связанные с перечислением элементарных событий (метод прямого перебора, комбинаторный метод), топологические и структурно-логические методы (методы минимальных путей и минимальных сечений, разложения относительно особого элемента, методы с использованием графов состояний и деревьев отказов и др.), а также методы математического и статистического моделирования.

Соединение элементов в структурных схемах надежности сводят к четырем основным видам: последовательному, параллельному, смешанному, произвольному.

2.2. ОБЪЕКТЫ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Последовательное соединение элементов в структурной схеме надежности – это такое соединение, при котором отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всего объекта в целом.

Такой тип соединения в теории надежности называют основным соединением.

Последовательная модель надежности представляет собой схему, состоящую из двух и более элементов, соединенных последовательно (рисунок 4). Элементы имеют вероятность безотказной работы соответственно $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$.

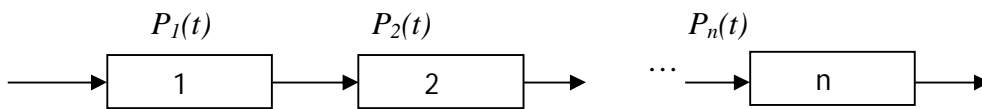


Рисунок 4

Условием работоспособности последовательной схемы является работоспособность всех составляющих ее элементов.

Вероятность безотказной работы объекта с последовательным соединением элементов равна произведению вероятностей безотказной работы отдельных ее элементов:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n \{1 - Q_i(t)\},$$

где $P_i(t), Q_i(t)$ – соответственно вероятность безотказной работы и вероятность отказа i -го элемента.

Если объект состоит из одинаковых элементов, имеющих равные вероятности безотказной работы:

$$P_c(t) = P_i^n(t), \quad Q_c(t) = 1 - P_i^n(t).$$

Если элементы работают в периоде нормальной эксплуатации и их вероятности безотказной работы подчиняются экспоненциальному закону, можно записать выражения вероятности безотказной работы через интенсивность отказов:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) dt}.$$

Отсюда, интенсивность отказов последовательной схемы соединения элементов равна сумме интенсивностей отказов отдельных элементов:

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t).$$

Если элементы имеют одинаковую надежность, то $\lambda_c(t) = n\lambda_i(t)$. Следовательно, надежность системы с последовательной структурой снижается с увеличением числа элементов. Для увеличения надежности необходимо уменьшать количество элементов, снижать интенсивность отказов элементов или увеличивать среднюю наработку до отказа.

Для периода нормальной эксплуатации наработка до отказа последовательной структуры:

$$T_o = \frac{1}{\lambda_c} = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \right)^{-1}.$$

Анализ полученных выражений позволяет сделать следующие выводы:

- вероятность безотказной работы будет тем ниже, чем большее число элементов составляют последовательное соединение;
- вероятность безотказной работы последовательного соединения всегда ниже, чем вероятность безотказной работы самого ненадежного элемента соединения (хуже худшего).

2.3. ОБЪЕКТЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Параллельным соединением элементов в структурной схеме надежности называется такое соединение, при котором объект отказывает только при отказе всех составляющих его элементов (рисунок 5).

Условием работоспособности объекта с параллельным соединением элементов в течение наработки t необходимо и достаточно, чтобы хотя бы один элемент был в работоспособном состоянии.

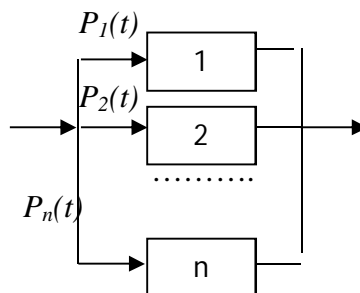


Рисунок 5

Параллельная модель надежности отображает систему, состоящую из двух и более элементов, соединенных параллельно. На рисунке 5 обозначения $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$ имеют тот же смысл, что и в последовательной модели надежности.

Если отказы элементов независимы друг от друга, то вероятность отказа объекта равна произведению вероятностей отказа его элементов:

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)],$$

а вероятность безотказной работы:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)].$$

Если все элементы объекта имеют одинаковую надежность, то

$$Q_c(t) = Q_i^n(t) = [1 - P_i(t)]^n, \quad P_c(t) = 1 - Q_i^n(t) = 1 - [1 - P_i(t)]^n.$$

При экспоненциальном законе распределения вероятность безотказной работы через интенсивность отказов можно записать:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}\right).$$

Если все элементы имеют одинаковую надежность, то:

$$P(t) = 1 - \left(1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}\right)^n.$$

При $\lambda = \text{const}$ последнее выражение принимает вид:

$$P(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^n.$$

Среднее время наработки параллельной структуры до отказа равно:

$$T_o = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \left\{1 - \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^n\right\} dt.$$

После интегрирования последнего выражения получим:

$$T_o = \frac{1}{\lambda_c} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}\right) = \frac{1}{\lambda_c} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}.$$

Анализ полученных выражений позволяет сделать следующие выводы:

- вероятность безотказной работы объекта с параллельным соединением элементов повышается с увеличением числа элементов;
- вероятность безотказной работы параллельного соединения всегда выше, чем вероятность безотказной работы самого надежного элемента соединения (лучше лучшего).
- наработка объекта до отказа с параллельным соединением элементов больше наработки на отказ его элементов.

2.4. ОБЪЕКТЫ СО СМЕШАННЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

В структурных схемах надежности объекта со смешанным соединением элементов присутствуют одновременно последовательные и параллельные схемы надежности (рисунок 6).

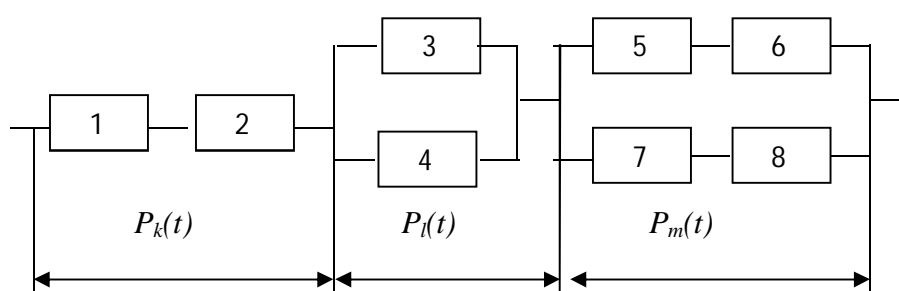


Рисунок 6

Для расчета надежности объекта применяют метод «свертки». Метод свертки состоит из нескольких этапов:

- на первом этапе рассматриваются все параллельные соединения, которые заменяются эквивалентными элементами с соответствующими показателями надежности;
- на втором этапе рассматриваются все последовательные соединения, которые заменяются эквивалентными элементами;
- на третьем этапе вновь рассматриваются все параллельные соединения, которые заменяются эквивалентными элементами;
- преобразования продолжают до тех пор, пока исходная структурная схема надежности не будет преобразована к схеме последовательного соединения элементов.

Так, оценку безотказности системы, представленной на рисунке, можно выполнить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P_k(t) &= P_1(t)P_2(t), \\
 P_l(t) &= 1 - [1 - P_3(t)][1 - P_4(t)], \\
 P_m(t) &= 1 - [1 - P_5(t)P_6(t)][1 - P_7(t)P_8(t)].
 \end{aligned}$$

В итоге структурная схема надежности будет преобразована к последовательному соединению (рисунок 7):

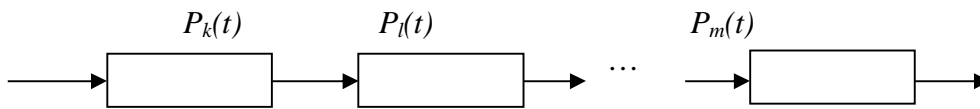


Рисунок 7

Тогда $P_c(t) = P_k(t)P_l(t)P_m(t)$.

2.5. ОБЪЕКТЫ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Одной наиболее часто встречаемой схемой объекта с произвольным соединением элементов является мостиковая схема (рисунок 8).

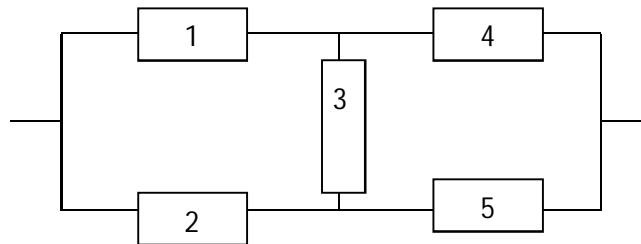


Рисунок 8

Показатели надежности такой схемы определяют:

- логико-вероятностным методом;
- методом минимальных путей и сечений;
- эквивалентными структурными преобразованиями соединений «треугольник» в соединение «звезда»;
- методом разложения структуры по «ключевым элементам».

2.5.1. Логико-вероятностный метод

При использовании логико-вероятностного метода математическая модель объекта составляется в терминах алгебры логики. В результате составляется формализованная модель, которая определяет условие работоспособности или отказа объекта – функцию работоспособности или неработоспособности. При ее составлении для каждого элемента рассматривают два несовместных состояния – работоспособного и неработоспособного.

Для составления функции работоспособности (неработоспособности) составляют таблицу перебора всех состояний рассматриваемого объекта (таблица 2). Число рассматриваемых состояний объекта равно 2^n , где n – число элементов в составе объекта. В таблице применяют формализованное обозначение работоспособного состояния элемента числом «1», неработоспособного состояния – «0».

Таблица 2

№ состояния	Номер элемента					Функция надежности
	1	2	3	...	n	
1	0	0	0	...	0	$Q_1 Q_2 Q_3 \dots Q_n$
2	0	0	0	...	1	$Q_1 Q_2 Q_3 \dots P_n$
3	0	0	0	...	0	$Q_1 Q_2 Q_3 \dots Q_n$
4	0	0	0	...	1	$Q_1 Q_2 Q_3 \dots P_n$
5	0	0	0	...	0	$Q_1 Q_2 Q_3 \dots Q_n$
6	0	0	0	...	1	$Q_1 Q_2 Q_3 \dots P_n$
...
2^n	1	1	1	...	1	$P_1 P_2 P_3 \dots P_n$

В зависимости от решаемой задачи определения вероятности безотказной работы или вероятности отказа из всей совокупности функций надежности выбирают только те, которые удовлетворяют условиям поставленной задачи.

Результирующая вероятность безотказной работы (вероятность отказа) равна сумме произведений выбранных функций безотказной работы (функций отказа).

Логико-вероятностный метод является универсальным, может применяться для любого типа соединения элементов в структурной схеме надежности. Ограничение для метода – при увеличении числа элементов резко растет число рассматриваемых состояний объекта. Это создает известные трудности для анализа надежности объекта.

2.5.2. Методы минимальных путей и минимальных сечений

Для сокращения объема преобразований при составлении логических функций на основании структурной схемы предварительно составляется логическая схема объекта. Логические схемы составляются путем применения методов минимальных путей и минимальных сечений.

Минимальным путем (кратчайшим путем успешного функционирования или минимальным проходным сочетанием) называется последовательный набор работоспособных элементов, который обеспечивает работоспособность объекта, а отказ любого из них приводит к его отказу. Минимальных путей в объекте может быть один или несколько. Объект с последовательным соединением элементов имеет только один минимальный путь, включающий все его элементы. В объекте с параллельным соединением элементов число минимальных путей равно числу элементов и каждый минимальный путь включает в себя один из элементов.

Метод минимальных путей дает оценку нижней границы надежности объекта.

Для расчета верхней оценки вероятности безотказной работы объекта используют метод минимальных сечений (разрезов). Минимальным сече-

нием называется последовательный набор элементов, отказ которых приводит к отказу объекта, а восстановление работоспособности любого из них – к восстановлению работоспособности объекта.

Минимальных сечений в объекте может быть один или несколько. Объект с параллельным соединением элементом имеет только одно минимальное сечение, включающее все его элементы. В объекте с последовательным соединением элементов число минимальных сечений совпадает с числом элементов, и каждое минимальное сечение включает один из них.

Так, для рассматриваемой мостиковой схемы соединения элементов структурные схемы надежности метода минимальных путей и минимальных сечений имеют следующий вид, который представлен на рисунке 9.

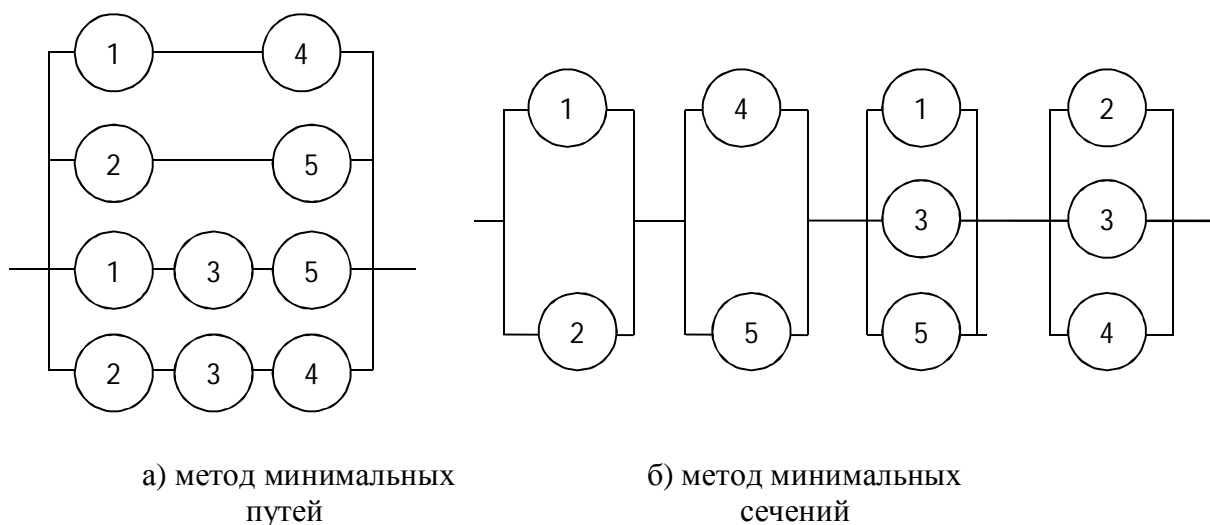


Рисунок 9

2.5.3. Метод преобразования соединения «треугольник» в соединение «звезда»

Мостиковую схему соединения элементов можно рассматривать как соединение двух треугольников, имеющих один общий элемент под номером 3.

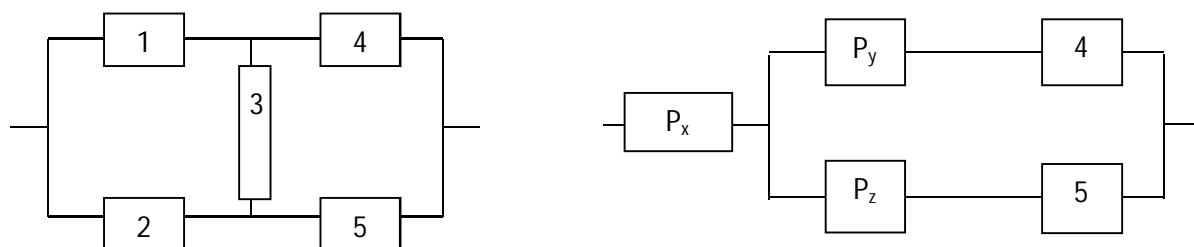


Рисунок 10

Метод состоит в преобразовании исходной схемы в схему смешанного соединения элементов, для которой можно применить метод «свертки»

(рисунок 10). Предполагаются известными вероятности безотказной работы каждого элемента. Для преобразованной схемы необходимо вычислить вероятности безотказной работы P_x, P_y, P_z .

Так как вероятности безотказной работы элементов близки к единице, для вывода уравнений преобразований используют вероятности появления отказов $Q(t)$ элементов. Тогда система уравнений, устанавливающая взаимосвязь между показателями надежности исходной схемы и преобразованной, имеет вид:

$$\begin{cases} Q_x + Q_y Q_z - Q_x Q_y Q_z = Q_1 Q_2 \\ Q_y + Q_x Q_z - Q_x Q_y Q_z = Q_1 Q_3 \\ Q_z + Q_x Q_y - Q_x Q_y Q_z = Q_2 Q_3 \end{cases}$$

Считая, что вероятности отказов элементов малы, пренебрежем произведениями вероятностей отказов. В результате получим приближенные уравнения перехода от схемы «треугольник» к схеме «звезда»:

$$\begin{cases} Q_x \approx Q_1 Q_2 & P_x = 1 - Q_x \\ Q_y \approx Q_1 Q_3 & P_y = 1 - Q_y \\ Q_z \approx Q_2 Q_3 & P_z = 1 - Q_z \end{cases}$$

Зная величины вероятностей отказов, можем определить величину искомых вероятностей безотказной работы элементов преобразованной схемы: P_x, P_y, P_z .

2.5.4. Метод разложения структуры по «ключевым элементам»

Сущность метода заключается в замене исходной структуры двумя более простыми, такими, что сумма вероятностей работоспособных состояний этих структур равна вероятности работоспособного состояния исходной структуры.

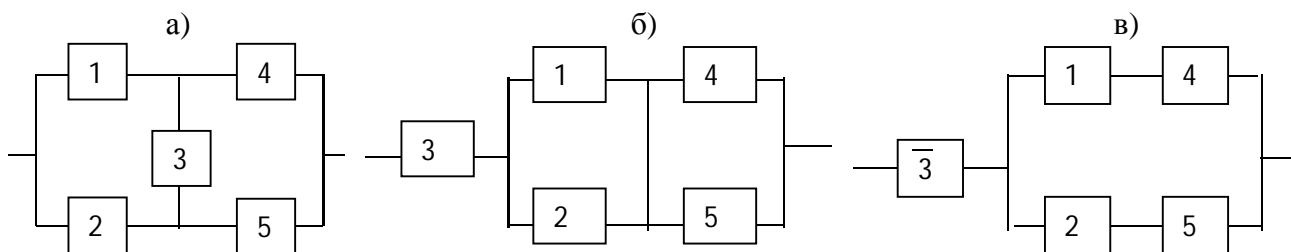


Рисунок 11

Задача определения надежности объекта решается в три этапа.

1. В качестве ключевого элемента выбирается элемент, который имеет наибольшее число соединений с другими элементами объекта. В нашем случае это элемент под номером 3.

2. Считаем, что элемент 3 является абсолютно надежным. Тогда вместо элемента 3 можно поставить жесткую связь и схема преобразуется к виду б), но к ней необходимо присоединить последовательно элемент 3, так как необходимо учесть вероятность его работоспособного состояния. Применяя метод «свертки», определяем вероятность безотказной работы схемы – P_6 .

3. Считаем, что элемент 3 находится в состоянии отказа. Тогда на схеме его положение следует обозначить обрывом цепи. К полученной схеме добавляем элемент с вероятностью отказа ключевого элемента. В результате получим схему в). Применяя метод «свертки», определяем вероятность безотказной работы схемы – $P_в$.

4. Определяем вероятность безотказной работы объекта

$$P(t) = P_6(t) + P_в(t).$$

Лекция 3

3.1. ПОНЯТИЕ О ПОТОКЕ ОТКАЗОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЙ

Восстанавливаемым называется объект, для которого восстановление работоспособного состояния после отказа предусмотрено в нормативно-технической документации.

Для восстанавливаемых объектов характерно чередование работоспособного состояния и восстановления работоспособности после отказа (рисунок 12). Таким образом, процесс эксплуатации объекта можно представить как последовательное чередование случайных событий интервалов времени работоспособного t_{pi} и неработоспособного состояний t_{Bi} .

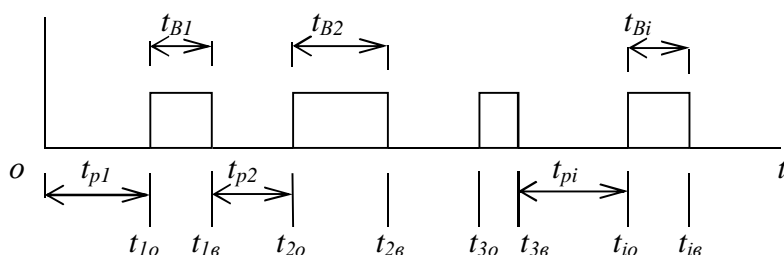


Рисунок 12

Простейшей моделью функционирования восстанавливаемого объекта является такая, при которой он в начальный момент времени $t = 0$ работоспособен. Затем какое-то случайное время t_{p1} работает до первого отказа, затем следует восстановление свойств, после чего объект снова работает случайное время t_{p2} до второго отказа, затем восстанавливается и так далее.

Моменты отказов $t_{1o}, t_{2o}, \dots, t_{io}$ образуют **поток событий отказов**, а моменты окончания восстановления $t_{1e}, t_{2e}, \dots, t_{ie}$ образуют **поток событий восстановлений**. Указанные потоки представляют собой случайные процессы.

Случайный поток событий, функция распределения которого подчиняется экспоненциальному закону $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, называется потоком Пуассона. В данном случае λ (среднее число событий в единицу времени) называется интенсивностью случайного потока.

Для пуассоновского потока вероятность наступления ровно k событий в промежутке времени (t_0, t) равна:

$$P_K(t_0, t) = P_K(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

и не зависит от времени t_0 , то есть в пуассоновском потоке время ожидания нового события не зависит от времени, прошедшего после последнего события. Для пуассоновского потока математическое ожидание случайного числа отказов $n(t)$ событий за время t равно:

$$M[n(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} kP_k(t) = \lambda t.$$

Пуассоновский поток обладает следующими свойствами:

1. Стационарностью – вероятностные характеристики потока для любого интервала времени зависят только от длительности этого интервала и не зависят от момента его начала.

Стационарность потока отказов означает, что вероятность появления определенного числа отказов за определенный интервал времени длительностью Δt не зависит от того, где располагается на оси времени этот интервал, а зависит только от длительности самого интервала.

2. Ординарностью – в бесконечно малом интервале времени вероятность появления двух и более событий бесконечно мала. То есть, в один и тот же момент времени появление более одного отказа невозможно.

3. Отсутствием последействия – начиная с некоторого момента времени вероятность появления отказа в рассматриваемом интервале времени не зависит от того, сколько было отказов до момента начала рассматриваемого промежутка времени. Отсутствие последействия выражает взаимную независимость отказов, отказы являются событиями случайными и независимыми.

3.2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

При анализе надежности восстанавливаемых объектов следует отметить, что до возникновения первого отказа к ним можно применить те же методы определения показателей надежности, что и для невосстанавливаемых объектов. Но, как только в восстанавливаемом объекте возникнет отказ, он восстанавливается до работоспособного состояния, после чего работает до возникновения следующего отказа. Эти циклы продолжаются до наступления предельного состояния.

Для анализа надежности восстанавливаемых объектов используются следующие показатели:

- $\omega(t)$ – параметр потока отказов;
- T – среднее время работы между отказами (средняя наработка на отказ);
- $P(t)$ – вероятность безотказной работы;
- $Q(t)$ – вероятность отказа.

Параметр потока отказов $\omega(t)$ – отношение среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки.

$$\omega(t) = \frac{dn(t)}{dt},$$

где $n(t)$ – число отказов объекта за наработку t .

Статистическая оценка параметра потока отказов

$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t},$$

где $n(\Delta t)$ – число отказов в рассматриваемом промежутке времени Δt ; N – число объектов поставленных на испытания, при условии, что отказавшие объекты восстанавливаются или заменяются аналогичными, но новыми. Размерность параметра потока отказов – ч^{-1} .

Параметр потока отказов обладает следующим свойством: если поток отказов стационарен, то $\omega(t) = \omega = \lambda$. То есть в системах железнодорожной автоматики и телемеханики понятия «интенсивность отказов» и «параметр потока отказов» можно не разделять.

Для ординарных потоков при известном параметре потока отказов можно определить математическое ожидание числа отказов $n(t)$ за время t :

$$M[n(t)] = \int_0^t \omega(t) dt.$$

Для стационарного потока отказов $\omega = \text{const}$, тогда $n(t) = \omega t$.

Время работы между отказами – наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа.

Средняя наработка на отказ T (наработка на отказ) – отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки:

$$T = \frac{t}{M[n(t)]}.$$

Статистическая оценка наработки на отказ:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{pi},$$

где t_{pi} – время работы между отказами i -го элемента, n – наблюдаемое число отказов за это же время.

При известном параметре потока отказов наработка на отказ равна:

$$T = \frac{1}{\omega(t)}.$$

Вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта в рассматриваемом интервале наработки:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \omega(t) dt}.$$

Вероятность отказов:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\int_0^t \omega(t) dt}.$$

В случае стационарности потока отказов, когда $\omega = const$:

$$P(t) = e^{-\omega t}, \quad Q(t) = 1 - e^{-\omega t}, \quad T = \frac{1}{\omega}.$$

3.3. ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Отказавшие объекты восстанавливаются в ходе проведения ремонтов. В результате восстанавливается работоспособное состояние объекта. Для оценки возможности восстановления введены показатели ремонтпригодности, к которым относят:

- $\mu(t)$ – параметр потока восстановлений (интенсивность восстановлений);
- $f(t_B)$ – частота восстановлений;
- T_B – среднее время восстановления;
- $P_B(t)$ – вероятность восстановления;
- $Q_B(t)$ – вероятность невосстановления.

Параметр потока восстановлений (интенсивность восстановления) работоспособного состояния объекта $\mu(t)$ – условная плотность вероятности восстановления объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не произошло.

Аналитическое определение параметра потока восстановлений:

$$\mu(t) = \frac{f(t_B)}{1 - P_B(t)}$$

где $f(t_B) = dP_B(t)/dt$ – частота восстановлений.

Статистическая оценка параметра потока восстановлений:

$$\mu(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{\text{НВ}}(t)\Delta t'}$$

где $n_B(\Delta t)$ – число восстановленных элементов за промежуток времени Δt ; $N_{\text{НВ}}(t)$ – число невосстановленных объектов за промежуток времени Δt . Размерность параметра потока восстановлений – ч⁻¹.

Вероятность восстановления работоспособного состояния объекта – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного. То есть вероятность того, что отказавший объект будет восстановлен в течение заданного времени.

Вероятность восстановления лежит в пределах $0 \leq P_B(t) \leq 1$. Причем $P_B(0) = 0$, $P_B(\infty) = 1$.

Вероятность восстановления объекта за время t при известном параметре потока восстановлений

$$P_B(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t)dt}.$$

Статистическая оценка вероятности восстановления за время t :

$$P_B(t) = \frac{n_B(t)}{N_B},$$

где $n_B(t)$ – число восстановленных объектов за время t , N_B – число объектов поставленных на восстановление.

Вероятность невосстановления работоспособного состояния объекта – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта превысит заданное.

Вероятность невосстановления равна:

$$Q_B(t) = 1 - P_B(t) = 1 - \left(1 - e^{-\int_0^t \mu(t)dt}\right).$$

Среднее время восстановления есть математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа.

Среднее время восстановления T_B определяется отношением среднего времени восстановлений объекта к среднему числу числа восстановлений при длительной работе объекта.

При известной величине вероятности восстановления среднее время восстановления определяется как:

$$T_B = \int_0^{\infty} [1 - P_B(t)] dt.$$

Статистическая оценка среднего времени восстановления:

$$T_B = \frac{1}{n_B} \sum_{i=1}^{n_B} t_{B_i}$$

где t_{B_i} – длительность времени восстановления i -го элемента; n_B – число восстановлений.

При известном значении параметра потока восстановлений $T_B = \frac{1}{\mu(t)}$.

Частота восстановления – плотность распределения времени восстановления.

Таким образом, $f(t_B) = \frac{d}{dt} P_B(t)$.

В случае стационарности потока восстановлений, когда $\mu = const$:

$$P_B(t) = 1 - e^{-\mu t}, \quad Q_B(t) = 1 - (1 - e^{-\mu t}), \quad T_B = \frac{1}{\mu}.$$

3.4. КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Часто для оценки эксплуатационной надежности объектов единичных показателей бывает недостаточно. Поэтому используют комплексные показатели, характеризующие одновременно несколько свойств надежности (безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость).

Наиболее распространенными комплексными показателями являются:

- коэффициент готовности;
- коэффициент простоя;
- коэффициент оперативной готовности;
- коэффициент технического использования.

Коэффициент готовности K_G – 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 готовности – вероятность того, что система будет работоспособной при длительной эксплуатации (стационарный режим).

Значение коэффициента готовности изменяется от нуля (когда все элементы за рассматриваемый период неработоспособны) до единицы (когда все элементы за рассматриваемый период работоспособны).

Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к применению только в отношении его работоспособности и, следовательно, означает вероятность застать объект в работоспособном состоянии в произвольный момент времени. Причем этот момент не может быть выбран в тех интервалах времени, где применение объекта исключено.

В практических задачах оценки надежности объекта используют статистическую оценку коэффициента готовности:

$$K_G = \frac{T}{T + T_B} = \frac{1}{1 + \omega T_B} = \frac{1}{1 + \frac{\omega'}{\mu}}$$

где T – наработка на отказ; T_B – среднее время восстановления; ω – параметр потока отказов; μ – параметр потока восстановлений.

Для непрерывно работающих объектов коэффициент готовности равен:

$$K_G = \frac{T_K - t_B}{T_K},$$

где T_K – календарное время работы объекта, в течение которого зафиксировано суммарное время восстановления t_B .

Коэффициент готовности оценивает два свойства объекта – безотказность и восстанавливаемость и характеризует эксплуатационную технологичность объекта, качество планирования работ, совершенство средств эксплуатации и ремонта, уровень организации работ, обученность персонала.

Коэффициент простоя K_{II} – вероятность того, что объект окажется в неработоспособном состоянии в произвольно выбранный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта не предусматривается.

Коэффициент простоя характеризует вероятность неработоспособного состояния восстанавливаемого объекта при его длительной эксплуатации.

В практических задачах оценки надежности элемента используют статистическую оценку коэффициента простоя:

$$K_{II}(t) = \frac{T_B}{T + T_B} = \frac{1}{1 + \mu T} = \frac{1}{1 + \frac{\mu'}{\omega}}$$

Так как по определению $K_G(t) + K_{II}(t) = 1$, то $K_{II}(t) = 1 - K_G(t)$.

С коэффициентом простоя тесно связано **время простоя**. Оно определяется выражением:

$$T_{II} = K_{II}(t) \cdot \Delta t.$$

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Коэффициент характеризует надежность объектов, необходимость применения которых возникает в произвольный момент времени, после которого требуется безотказная работа в течение заданного времени. До этого момента объект может находиться в режиме дежурства или выполнять другие функции.

Численное значение коэффициента оперативной готовности равно произведению коэффициента готовности $K_{Г}(t)$ на вероятность безотказной работы объекта в интервале времени τ :

$$K_{ОГ}(t, \tau) = K_{Г}(t) \cdot P(\tau).$$

Статистическая оценка коэффициента оперативной готовности

$$K_{ОГ}(t, \tau) = \frac{N_t(\tau)}{N},$$

где $N_t(\tau)$ – число объектов, исправных в момент времени t и безотказно проработавших в течение времени τ , N – общее число объектов.

Если цикл эксплуатации восстанавливаемых элементов помимо интервалов безотказной работы и периодов восстановления содержит простои, обусловленные техническим обслуживанием элемента в процессе эксплуатации (профилактические работы), то для комплексной оценки их надежности применяется коэффициент технического использования.

Коэффициент технического использования – вероятность того, что элемент в произвольный момент времени будет в работоспособном состоянии с учетом проведения технического обслуживания.

Статистическая оценка коэффициента технического использования:

$$K_{ТИ} = \frac{T}{T + T_{В} + T_{ТО}}.$$

Коэффициент технического использования наряду с безотказностью и ремонтпригодностью оценивает эксплуатационно-технические свойства элемента – потребность в техническом обслуживании.

Лекция 4

4.1. МЕТОДЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Резервирование – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких элементов.

Минимальная функциональная структура – это структура объекта, изменение которой за счет исключения каких-либо элементов и (или) связей влечет невозможность выполнения заданного набора функций. Минимальную функциональную структуру объекта иногда называют основной.

Основной элемент – элемент, необходимый для выполнения требуемых функций без использования резерва.

Резервный элемент – элемент, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае его отказа.

Резервированный объект – совокупность основного и резервных элементов.

С целью повышения надежности применяют временное, информационное, функциональное, нагрузочное, программное, структурное резервирование.

Временное резервирование – используется резервное (свободное) время для выполнения дополнительных функций. Например, резервное время может быть использовано для повтора передачи информации, для устранения неисправности.

Информационное резервирование – в качестве резерва используется избыточная информация. К информационному резервированию относятся: многократная передача по одному каналу одной и той же информации, использование дополнительных разрядов при кодировании информации.

Функциональное резервирование – используется способность элементов выполнять дополнительные функции.

Нагрузочное резервирование – используется способность элементов воспринимать дополнительные нагрузки (электрические, механические и т. д.).

Программное резервирование предусматривает использование избыточных программ или их элементов, входящих в состав программного обеспечения объектов.

Структурное резервирование осуществляется путем введения дополнительных элементов в структуру объекта, которые выполняют функции основных в случае их отказа.

Классификация различных способов структурного резервирования осуществляется по следующим признакам.

1. По схеме включения резервных элементов:

- общее резервирование – при котором резервируется объект в целом;
- раздельное резервирование – при котором резервируются отдельные элементы системы или группа элементов объекта.

2. По однородности резервирования:

- однородное резервирование – при котором используется один способ резервирования;
- смешанное резервирование, при котором сочетаются различные виды резервирования.

3. По способу включения резерва:

- постоянное резервирование – при отказе основного элемента перестройка структуры объекта не происходит;
- динамическое резервирование – при отказе основного элемента происходит перестройка структуры объекта;
- резервирование замещением – выполняемые функции основного элемента передаются резервному элементу после отказа основного;
- скользящее резервирование – группа основных элементов резервируется одним или несколькими резервными элементами с помощью переключающих устройств. Причем резервный элемент может резервировать любой из отказавших основных элементов;
- фиксированное резервирование, при котором каждый резервный элемент закреплен за одним из основных.

4. По восстановлению работоспособности отказавших элементов:

- резервирование с восстановлением (восстанавливаемый резерв), при котором работоспособность отказавших элементов восстанавливается без прекращения функционирования всего объекта;
- резервирование без восстановления (не восстанавливаемый резерв), при котором работоспособность отказавших элементов не восстанавливается.

5. По нагрузке резерва:

- нагруженное (горячее) резервирование – основной и резервный элементы работают в одинаковом режиме;
- облегченное (теплое) резервирование – резервный элемент находится в менее нагруженном режиме работы, чем основной элемент;
- ненагруженное (холодное) резервирование – резервные элементы не несут нагрузки до момента подключения их вместо отказавшего основного элемента.

Основной характеристикой структурного резервирования является его **кратность** – отношение числа резервирующих элементов к числу резервируемых элементов (основных), выраженное несокращенной дробью.

Кратность резервирования m определяется соотношением:

$$m = \frac{p}{o},$$

где p – число резервных элементов; o – число основных элементов.

Если $m = 1$, резервирование выполнено с целой кратностью. Это означает наличие одного основного и одного резервного элемента, а общее число элементов объекта равно двум.

Если $m = 3$, резервирование выполнено с целой кратностью. Это предполагает наличие одного основного и трех резервных элементов, а общее число элементов равно четырем.

Если $m = 4/2$, это означает наличие резервирования с дробной кратностью, при котором число резервных элементов равно 4, число основных элементов равно 2, а общее число элементов равно 6. Сокращать дробь нельзя, так как если $m = 4/2 = 2$, это будет означать резервирование с целой кратностью, при котором число резервных элементов равно 2, а общее число элементов равно 3.

4.2. НАДЕЖНОСТЬ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ

Расчет количественных характеристик надежности объектов с резервированием определяется видом резервирования. Все рассматриваемые математические зависимости приводятся без учета надежности переключающих устройств, обеспечивающих перераспределение нагрузки между основными и резервными элементами.

4.2.1. Общее горячее резервирование с целой кратностью

Структурная схема надежности общего горячего резервирования с целой кратностью имеет вид, как на рисунке 13.

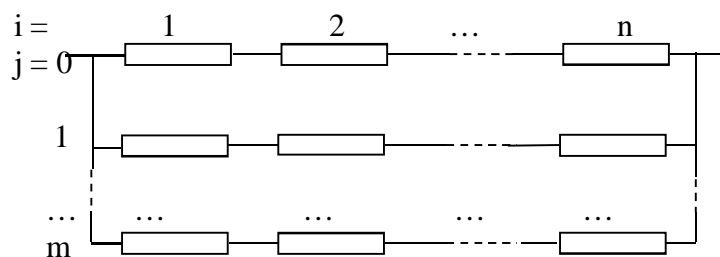


Рисунок 13

При общем горячем резервировании основной и каждый резервирующий объект имеют одинаковое количество элементов, соединенных последовательно в структурной схеме надежности. Резервирующие объекты включены параллельно основному объекту и самим себе.

В каждом объекте с последовательным соединением элементов вероятность безотказной работы определяется на основании выражений:

$$P_0(t) = \prod_{i=1}^n P_{0i}(t), \quad P_1(t) = \prod_{i=1}^n P_{1i}(t), \dots, \quad P_m(t) = \prod_{i=1}^n P_{mi}(t).$$

Основной и резервирующие объекты, состоящие из последовательно соединенных элементов, составляют структурную схему надежности объекта с параллельным соединением.

Тогда вероятность безотказной работы $P_C(t)$ объекта:

$$P_C(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1},$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента.

Если известна интенсивность отказов элемента и она является величиной постоянной, тогда:

$$P_C(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1},$$

где $\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ – интенсивность отказов основного объекта или любого из резервных объектов.

Наработка до отказа резервированного объекта:

$$T = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=0}^m \frac{1}{j+1}.$$

Интенсивность отказов резервированного объекта:

$$\lambda_C = \frac{(m+1)\lambda_0 \cdot e^{-\lambda_0 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 t})^m}{1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}} = \frac{(m+1)\lambda_0 P_0(t) Q_0^m(t)}{1 - Q_0^{m+1}(t)}.$$

Общее горячее резервирование для невосстанавливаемых объектов дает хороший эффект при малых значениях произведения $\lambda_0 t$. Этот вид резервирования наиболее целесообразно использовать для резервирования достаточно надежных объектов разового использования с коротким временем непрерывной работы.

Кратность резервирования m , необходимую для достижения заданной надежности резервированного объекта в определенный момент времени при заданной надежности основного объекта, можно найти из выражения:

$$m = \frac{\ln[1 - P_3(t)]}{\ln[1 - P_0(t)]} - 1 = \frac{\ln Q_3(t)}{\ln Q_0(t)} - 1,$$

где $P_3(t)$ – заданная надежность резервированного объекта в определенный момент времени; $P_0(t)$ – надежность основного объекта без резервирования.

4.2.2. Раздельное горячее резервирование с целой кратностью

Структурная схема надежности при раздельном горячем резервировании с целой кратностью имеет вид (рисунок 15):

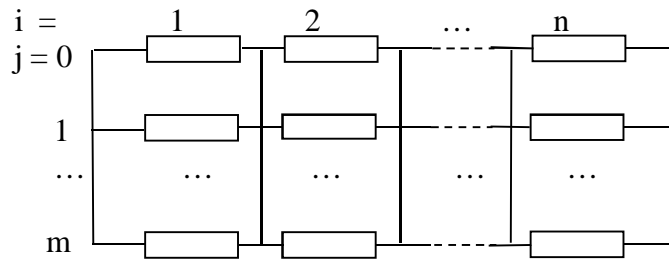


Рисунок 14

При раздельном горячем резервировании основной и каждый резервирующий объект могут иметь одинаковое и разное количество элементов. Резервирующие объекты включены параллельно самим себе и параллельно элементам основного объекта.

Здесь каждый i -й элемент основного объекта резервируется резервирующим элементом. При раздельном резервировании объект состоит из n последовательно соединенных элементов, каждый из которых имеет m соединенных параллельно, в смысле надежности, элементов.

Вероятность безотказной работы объекта $P_C(t)$ при раздельном горячем резервировании равна:

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n \{1 - [1 - P_i(t)]^{m_i+1}\} = \prod_{i=1}^n [1 - Q_i^{m_i+1}(t)],$$

где m_i – кратность резервирования каждого i -го элемента основного объекта.

Если элементы имеют одинаковую надежность и одинаковую кратность резервирования, то вероятность безотказной работы объекта:

$$P_C(t) = [1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}]^n = [1 - Q_i^{m+1}(t)]^n.$$

Наработка до отказа резервированного объекта:

$$T = \frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)} \sum_{j=0}^m \frac{1}{\binom{j+1}{m+1} (\binom{j+1}{m+1} + 1) \dots (\binom{j+1}{m+1} + n - 1)}.$$

Интенсивность отказов резервированного объекта

$$\lambda_c = \frac{n(m+1) \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} \cdot (1 - e^{-\lambda t})^m}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}} = \frac{n(m+1) \cdot \lambda \cdot P(t) Q^m(t)}{1 - Q^{m+1}(t)},$$

где λ – интенсивность отказов одного элемента.

При прочих равных условиях отдельное резервирование дает существенное повышение надежности по сравнению с общим резервированием. Отдельное резервирование используется для повышения надежности объектов с большим числом элементов и длительным временем использования.

4.2.3. Общее горячее резервирование с дробной кратностью (мажоритарное резервирование)

Мажоритарный объект можно рассматривать как вариант объекта с параллельным соединением элементов, отказ которого произойдет, если из n элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся k элементов. Примером структурной схемы надежности при мажоритарном резервировании может служить объект «2 из 5» (рисунок 15).

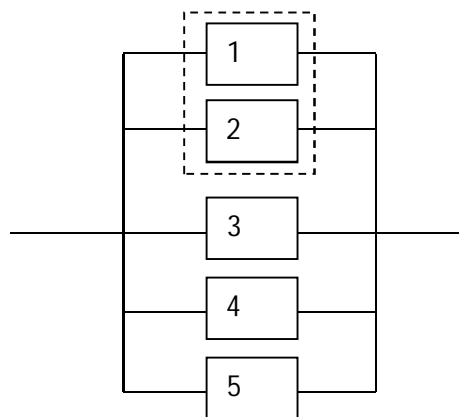


Рисунок 15

Представленная схема работоспособна тогда, когда из ее пяти элементов работоспособны любые два, три, четыре или все пять. На рисунке пунктирным контуром обведены условно первые два элемента. Все пять элементов имеют одинаковую надежность.

Для расчета надежности мажоритарных объектов может применяться комбинаторный метод.

Тогда вероятность безотказной работы объекта:

$$P_k = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k},$$

где

$$C_n^k = \frac{n!}{k! (n - k)!}.$$

Наработка до отказа резервированного объекта при равнонадежных элементах равна:

$$T_c = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=0}^k \frac{1}{n + j}.$$

Анализ последнего выражения позволяет сделать вывод о том, что среднее время безотказной работы у резервированного объекта меньше, чем у нерезервированного объекта. Следовательно, резервирование с дробной кратностью нецелесообразно использовать для объектов с длительным временем непрерывной работы.

4.2.4. Общее холодное резервирование с целой кратностью

В случае общего холодного резервирования работает основной объект, резервные объекты отключены с помощью специальных переключающих устройств. Структурная схема надежности имеет вид:

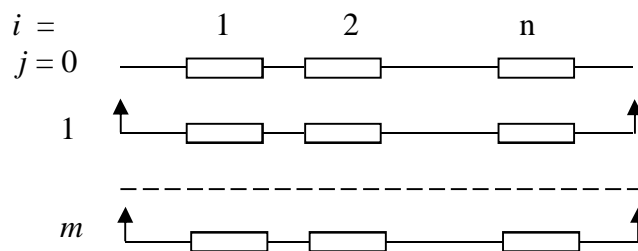


Рисунок 16

При отказе основного объекта он отключается, а вместо него подключается один из резервных объектов. Таким образом, резервированный объект откажет при отказе основного и всех резервных объектов. При этом предполагается, что переключающие устройства абсолютно надежны.

Тогда вероятность безотказной работы равна:

$$P_c(t) = \sum_{j=0}^m P(A_j) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!},$$

где $\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$.

Интенсивность отказов:

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^m}{m! \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!}}.$$

Наработка до отказа:

$$T_c = \frac{m+1}{\lambda_0} = (m+1)T_0.$$

Резервирование замещением является эффективным средством повышения надежности при низкой надежности основного нерезервированного объекта. Объекты с «холодным» резервом надежнее объектов с «горячим» резервом. Нарботка до отказа линейно увеличивается с ростом кратности резервирования.

4.2.5. Раздельное холодное резервирование с целой кратностью

При раздельном холодном резервировании с целой кратностью структурная схема надежности имеет вид (рисунок 17).

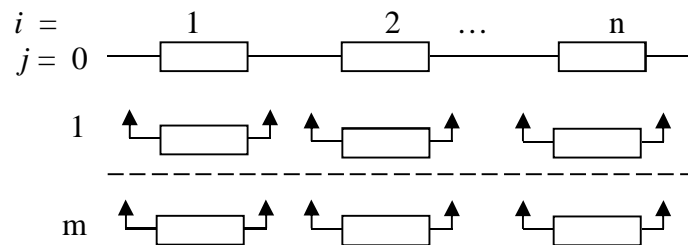


Рисунок 17

Вероятность безотказной работы основного объекта при последовательном соединении элементов

$$P_0(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы элементов объекта, резервированных по способу замещения.

Вероятность безотказной работы объекта при равной надежности всех элементов:

$$P_C(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[\sum_{j=0}^m \frac{(\lambda t)^j}{j!} \right]^n.$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda_C(t) = \frac{\lambda_0 (\lambda t)^m}{m! \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda t)^j}{j!}}$$

где λ – интенсивность отказов одного элемента, $\lambda_0 = n\lambda$.

Наработка до отказа

$$T_C = \frac{m+1}{\lambda_0} = (m+1)T_0.$$

Раздельное резервирование замещением при прочих равных условиях дает наибольший выигрыш надежности по сравнению с другими видами резервирования. Причем этот выигрыш тем больше, чем больше элементов имеет резервированная система.

2.4.6. Скользящее резервирование

Скользящее резервирование используется для повышения надежности нескольких одинаковых (или взаимозаменяемых) элементов объекта одним или несколькими резервными элементами. При этом отказ объекта произойдет, если число отказавших основных объектов превысит число резервных.

При скользящем резервировании структурная схема надежности имеет вид рисунок 18.

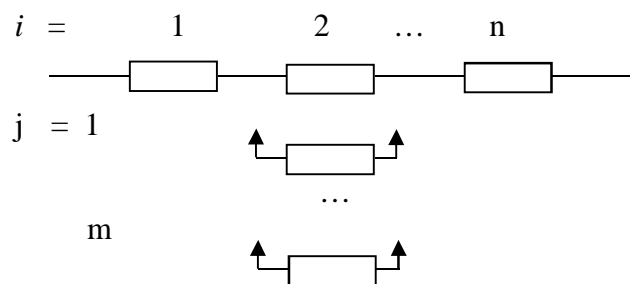


Рисунок 18

Этот вид резервирования применяется, если все элементы объекта выполняют одинаковые функции. Основной объект имеет n элементов, а m элементов находятся в холодном резерве. При этом $m < n$. При отказе любого основного элемента вместо него подключается любой из резервных элементов. В этом случае кратность резервирования составляет m/n .

Вероятность безотказной работы такого объекта равна:

$$P_C(t) = \sum_{j=0}^m P(A_j) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!},$$

где $\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$

Интенсивность отказов:

$$\lambda_C(t) = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^m}{m! \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!}}$$

Наработка до отказа $T_C = \frac{m+1}{\lambda_0} = (m+1)T_0$.

Это означает, что надежность объекта равна надежности объекта с общим резервированием с замещением, но в то же время она имеет в n раз меньше резервных элементов. Однако при этом существенно усложняются переключающие устройства.

Лекция 5

5.1. ПОНЯТИЕ О МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССАХ

Многое в природе развивается как случайный процесс, ход и исход которого зависит от множества случайных факторов. К их числу можно отнести отказ ЭВМ, помехи в движении поездов из-за аварий, отказов автоматики, характер движения потока клиентов и т. д.

Для математического описания случайного процесса применяется математический аппарат Марковских случайных процессов.

Случайный процесс, протекающий в системе S , называется Марковским случайным процессом или «процессом без последствия», если он обладает следующим свойством: для каждого момента времени t_0 вероятность любого состояния системы в будущем (при $t > t_0$) зависит только от ее состояния в настоящем (при $t = t_0$) и не зависит от того, когда и каким образом система пришла в это состояние (т. е. как развивался процесс в прошлом). В Марковском случайном процессе его развитие в будущем зависит только от настоящего состояния и не зависит от «предыстории» процесса.

В зависимости от того, непрерывное или дискретное множество значений принимает случайный процесс $X(t)$ и его параметр время t , различают следующие виды Марковских случайных процессов.

Дискретный процесс с дискретным временем (цепь Маркова).

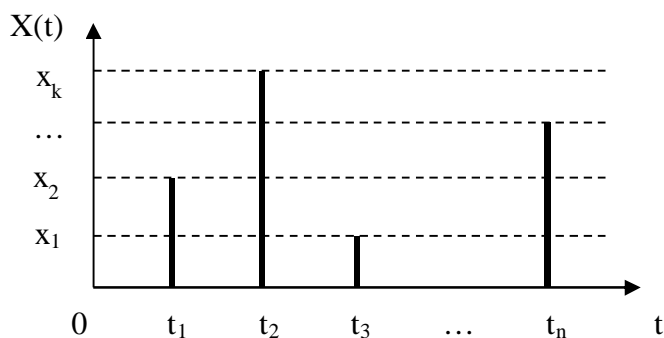


Рисунок 19

В данном случае переход системы из одного в другое состояние возможен в строго определенные моменты времени t_0, t_1, \dots, t_n , а случайный процесс $X(t_i)$ в промежутках между указанными моментами времени сохраняет свое состояние (рисунок 19). Такие процессы встречаются при машинной обработке информации в цифровых ЭВМ.

***Непрерывный процесс с дискретным временем
(Марковская последовательность).***

Случайный процесс $X(t)$ является непрерывным, а аргумент время t изменяется дискретно (рисунок 20).

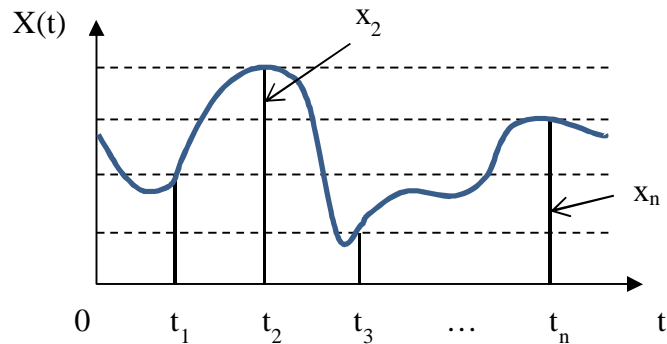


Рисунок 20

Примером может быть процесс накопления ущерба, наносимого рельсам на их стыках в результате ударов колесными парами вагонов в дискретные моменты времени.

***Дискретный процесс с непрерывным временем
(дискретный Марковский процесс).***

Случайный процесс называется дискретным Марковским процессом, если его состояния можно пронумеровать и переход из одного в другое состояние происходит скачком (рисунок 21). В этом случае случайный процесс $X(t)$ принимает дискретные значения $x_i, i = 1 \dots n$, время t изменяется непрерывно.

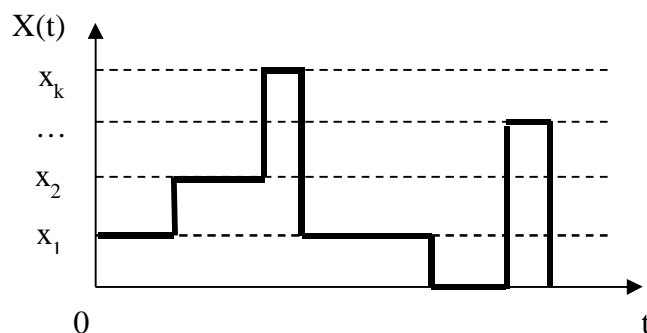


Рисунок 21

Примером такого процесса является процесс, протекающий в системах массового обслуживания.

Непрерывный Марковский процесс.

Случайный процесс $X(t)$ принимает значения из некоторого непрерывного пространства, а аргумент t изменяется также непрерывно (рисунок 22). Например, напряжение в осветительной сети представляет собой случайный процесс с непрерывными состояниями.

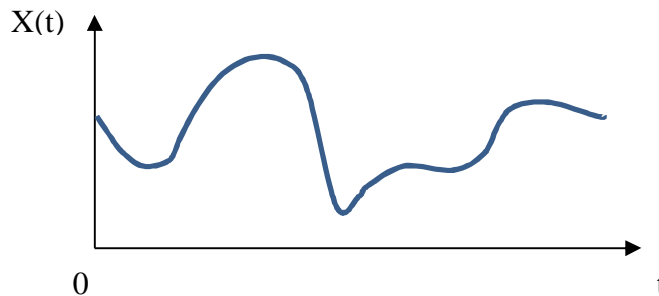


Рисунок 22

5.2. ПОНЯТИЕ О ГРАФЕ СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТОВ

При анализе случайных Марковских процессов пользуются графической схемой – графом состояний. Граф состояний является моделью надежности технической системы (рисунок 23).

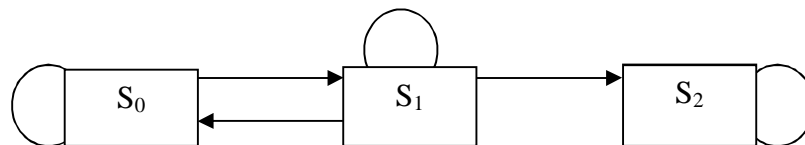


Рисунок 23. Пример графа состояний

На рисунке S_0 – исправное состояние, S_1 – работоспособное состояние, S_2 – предельное состояние.

Элементами графа состояний являются:

- прямоугольники изображают возможные состояния объекта;
- стрелки изображают возможные направления переходов объекта из одного состояния в другое. Над стрелками могут указываться либо интенсивности переходов, либо вероятности переходов объекта из одного в другое состояние. В случае если стрелка отсутствует – это означает невозможность перехода объекта;
- округлые стрелки обозначают событие, что объект останется в прежнем состоянии (исправное состояние продолжается, состояние отказа продолжается). В дальнейшем на графе не изображаются;
- состояние, из которого объект не может перейти ни в какое другое

(на графе состояний нет ни одной стрелки, исходящей из этого состояния), называют поглощающим или состоянием без выхода (состояние S_2).

Если на графе состояний над (под) стрелками поставлены интенсивности или вероятности переходов, то такой граф состояний называют размеченным.

Правило построения графа состояний:

– граф начинается с состояния, в котором все элементы системы работоспособны. Этому состоянию присваивается номер S_0 . Каждое следующее состояние получается из предыдущего вследствие отказа одного из элементов;

– количество следующих состояний равно количеству элементов, которые могут отказать в предыдущем состоянии. При этом считается, что неработоспособные и неработающие элементы отказать не могут;

– новые состояния добавляются до тех пор, пока не окажется, что все рассматриваемые состояния характеризуют неработоспособное состояние системы;

– все неработоспособные состояния системы являются конечными вершинами графа, так как неработоспособная система отказать не может. Такие состояния и соответствующие им вершины графа для невозстанавливаемых систем называются поглощающими.

Имея размеченный граф состояний, можно найти все возможные вероятности состояний исследуемого объекта.

Несомненным достоинством расчета надежности системы по размеченному графу состояний является его наглядность. А недостатком – необходимость анализа большого количества состояний и большой объем вычислений. Если каждый элемент системы может находиться только в двух состояниях (работоспособном и отказа), то общее количество состояний системы из n элементов равно 2^n . Тогда полный граф состояний будет содержать 2^n вершин (прямоугольников) и до $(2^n)^2$ прямых и обратных переходов (стрелок). Поэтому прямой аналитический расчет показателей надежности таких систем не всегда возможен.

5.3. МАРКОВСКИЙ СЛУЧАЙНЫЙ ПРОЦЕСС С ДИСКРЕТНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ И ДИСКРЕТНЫМ ВРЕМЕНЕМ (ЦЕПЬ МАРКОВА)

Дискретным Марковским процессом с дискретными состояниями и дискретным временем называют процесс, в котором возможные состояния системы S_1, S_2, \dots, S_n можно перечислить (пронумеровать), а сам процесс перехода системы из одного в другое состояние происходит в фиксированные моменты времени $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$. В промежутках между этими моментами времени система сохраняет свое состояние.

При любом шаге перехода системы события переходов образуют полную группу и несовместны, так как система может находиться лишь в ка-

ком-то одном из состояний, а не в двух и более сразу. При этом рассматриваются все возможные состояния системы.

Если каждое состояние системы в k -й момент времени свяжем с вероятностью, то получим вероятности состояний $P_1(k), P_2(k), P_3(k), \dots, P_n(k)$. Для любого момента времени $P_1(k) + P_2(k) + \dots + P_n(k) = 1$.

Для любого момента времени $t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$ существуют вероятности перехода системы из любого состояния в любое другое $P_{ij}(k)$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$). Их называют вероятностями перехода или переходными вероятностями. Эти вероятности отличны от нуля, если система переходит из одного состояния в другое, и равны нулю, если на данном шаге система остается в прежнем состоянии.

Если вероятности перехода не зависят от номера шага (момента времени) и не изменяются от шага к шагу, то такой Марковский процесс называют однородным. В противном случае Марковский процесс называют неоднородным.

Вероятностная картина возможных состояний системы и ее переходов может быть задана матрицей P , элементами которой являются переходные вероятности:

$$P(k) = \begin{bmatrix} p_{11}(k) & p_{12}(k) \dots & p_{1n}(k) \\ p_{21}(k) & p_{22}(k) \dots & p_{2n}(k) \\ p_{n1}(k) & p_{n2}(k) \dots & p_{nn}(k) \end{bmatrix}.$$

Матрица переходных вероятностей обладает следующими свойствами:

– сумма вероятностей, стоящих в каждой строке матрицы, равна единице:

$$\sum_{j=1}^n p_{ij}(k) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

– на главной диагонали матрицы стоят вероятности того, что система не выйдет из состояния S_i , а останется в нем;

– если переходная вероятность $P_{ij}(k) = 0$, то это означает, что на данном шаге система не может перейти из состояния S_i в состояние S_j .

Имея размеченный граф состояний или матрицу переходных вероятностей и зная начальное состояние системы, можно найти все возможные вероятности состояний системы для любого момента времени.

Для этого используют следующие уравнения:

– для однородного Марковского процесса:

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1)p_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

– для неоднородного Марковского процесса:

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1)p_{ij}(k), \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

5.4. МАРКОВСКИЙ СЛУЧАЙНЫЙ ПРОЦЕСС С ДИСКРЕТНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ И НЕПРЕРЫВНЫМ ВРЕМЕНЕМ (ДИСКРЕТНЫЙ ПРОЦЕСС)

Если переходы системы из одного состояния в другое происходят в случайные моменты времени, а система при этом принимает некоторое дискретное состояние, то в ней протекает Марковский случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Каждому возможному состоянию системы S_1, S_2, \dots, S_n соответствуют вероятности состояний $P_1(t), P_2(t), P_3(t), \dots, P_n(t)$.

Для любого момента времени сумма вероятностей состояний равна единице $P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + \dots + P_n(t) = 1$, как вероятности несовместных событий, образующих полную группу.

В случае случайного процесса с непрерывным временем рассматривают интенсивность перехода $\lambda_{ij}(t)$ системы из одного состояния в другое. Величина $\lambda_{ij}(t)$ по физическому смыслу является средним возможным числом переходов системы из состояния S_i в состояние S_j за единицу времени.

Если интенсивность потока событий $\lambda_{ij}(t) = \lambda_{ij} = const$ не зависит от времени, то такой поток событий называют стационарным.

Для описания системы, в которой протекает дискретный Марковский процесс, задают интенсивности $\lambda_{ij}(t)$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$) для всех возможных переходов системы из одного состояния в другое в виде матрицы интенсивностей переходов:

$$\Lambda(t) = \begin{bmatrix} \lambda_{11}(t) & \lambda_{12}(t) \dots & \lambda_{1n}(t) \\ \lambda_{21}(t) & \lambda_{22}(t) \dots & \lambda_{2n}(t) \\ \lambda_{n1}(t) & \lambda_{n2}(t) \dots & \lambda_{nn}(t) \end{bmatrix}.$$

Если какой-либо элемент матрицы $\Lambda(t)$ равен нулю, это означает, что переход системы из состояния S_i в состояние S_j невозможен. На главной диагонали матрицы стоят интенсивности переходов, характеризующие то, что система остается в прежнем состоянии.

Если интенсивности переходов $\lambda_{ij}(t)$ не зависят от времени, Марковский процесс называют однородным, в противном случае – неоднородным.

Имея размеченный граф состояний, можно определить неизвестные вероятности состояний как функции времени $P_1(t), P_2(t), P_3(t), \dots, P_n(t)$. Эти вероятности определяют с помощью системы дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\frac{d}{dt} P_k(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \lambda_{ik} P_i(t) - P_k(t) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \lambda_{kj}.$$

Мнемоническое правило составления системы дифференциальных уравнений Колмогорова:

- число дифференциальных уравнений в системе уравнений равно количеству рассматриваемых состояний системы;
- в левой части каждого уравнения записывают производную $P_k(t)$ от неизвестной вероятности состояния;
- число членов в правой части каждого уравнения равно числу стрелок, соединяющих рассматриваемое состояние с другими состояниями;
- каждый член правой части каждого уравнения равен произведению интенсивности перехода на вероятность того состояния, из которого выходит стрелка;
- знак произведения положителен, если стрелка входит в рассматриваемое состояние, и отрицателен – если стрелка выходит из него.

Лекция 6

6.1. МАРКОВСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ НЕРЕЗЕРВИРОВАННЫХ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Основными особенностями восстанавливаемых систем по сравнению с невозстанавливаемыми являются большое число состояний, наличие последствий отказов элементов, зависимость показателей надежности от большого числа факторов.

Для упрощения процесса расчета показателей надежности с помощью Марковских процессов применяют следующие допущения:

- законы распределения показателей надежности подчиняются экспоненциальному закону;
- состояние объекта контролируется непрерывно, т. е. момент отказа обнаруживается немедленно после его возникновения;
- восстановление объекта начинается сразу после его отказа при наличии свободной бригады; при отсутствии свободной бригады отказавший объект ставится в очередь на обслуживание.

Инженерная методика анализа надежности технических объектов, основанная на теории Марковских процессов, включает в себя следующие этапы:

1. Формулировка понятия «отказ» и определение исходных данных. Понятие «отказ» является понятием субъективным, поэтому его определение для конкретной системы согласуется с заказчиком.

2. Построение размеченного графа состояний системы. Рассматриваются все возможные состояния системы и возможные переходы из одного состояния в другое, последовательность переходов.

3. Составление по графу состояний дифференциальных уравнений Колмогорова.

4. Решение системы уравнений и определение вероятностей состояний системы.

Нерезервированная восстанавливаемая система в произвольный момент времени может находиться в одном из двух состояний: работоспособном S_0 с вероятностью $P_0(t)$ и неработоспособном S_1 с вероятностью $P_1(t)$.

Процесс функционирования системы отражается графом состояний (рисунок 24).

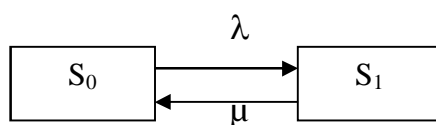


Рисунок 24

Из состояния S_0 в состояние S_1 система переходит в результате отказов с интенсивностью λ , а из состояния S_1 в состояние S_0 переходит в результате восстановления с интенсивностью μ . Потоки отказов и восста-

новлений являются простейшими, интенсивности потоков отказов и восстановлений являются величинами постоянными $\lambda = const, \mu = const$.

Система дифференциальных уравнений Колмогорова, характеризующих вероятности состояний системы:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P_0(t) = -P_0(t) \cdot \lambda + P_1(t) \cdot \mu \\ \frac{d}{dt} P_1(t) = P_0(t) \cdot \lambda - P_1(t) \cdot \mu. \end{cases}$$

Эта система дополнена нормирующим условием:

$$P_0(t) + P_1(t) = 1.$$

Если в начальный момент времени объект работоспособен $P_0(0) = 1$ и $P_1(0) = 0$, решение системы уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} P_0(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}; \\ P_1(t) &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}. \end{aligned}$$

Если в начальный момент времени объект неработоспособен $P_0(0) = 0$ и $P_1(0) = 1$, решение системы уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} P_0(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}; \\ P_1(t) &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}. \end{aligned}$$

При $t \rightarrow \infty$ независимо от начального состояния объекта – работоспособное или неработоспособное – вероятности $P_0(t)$ и $P_1(t)$ стремятся к постоянным значениям:

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}.$$

Это означает, что при экспоненциальном законе распределения времени наработки и времени восстановления случайный процесс работы восстанавливаемой системы по истечении некоторого времени стабилизируется, и вероятности застать систему в том или ином состоянии в произвольный момент времени остаются постоянными. В системе наступает стационарный процесс, и производные в системе уравнений становятся равными нулю. Вместо системы дифференциальных уравнений получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -P_0(t) \cdot \lambda + P_1(t) \cdot \mu \\ 0 = P_0(t) \cdot \lambda - P_1(t) \cdot \mu \end{cases}$$

$$P_0 + P_1 = 1.$$

При малых значениях величины $(\lambda + \mu)t$, когда $e^{-(\lambda + \mu)t} = 1 - (\lambda + \mu)t$, из системы уравнений можно получить:

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} [1 - (\lambda + \mu)t] = 1 - \lambda t,$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} [1 - (\lambda + \mu)t] = \lambda t.$$

Отсюда следует, что в начальный период эксплуатации объекта, если объект работоспособный, коэффициент готовности примерно равен вероятности безотказной работы системы, а вероятность $P_1(t)$ равна вероятности отказа $Q(t)$:

$$K_r = P_0 = 1 - \lambda t, \quad Q(t) = P_1 = \lambda t.$$

Если в начальный момент времени объект был неработоспособен, то коэффициент готовности примерно равен вероятности восстановления $P_0(t)$, а вероятность $P_1(t)$ – вероятности отсутствия восстановления.

Показатели надежности можно рассчитать непосредственно из размеченного графа состояний топологическим методом, не прибегая к составлению и решению системы дифференциальных уравнений.

Топологический метод имеет следующие особенности:

- простота вычислительных алгоритмов;
- высокая наглядность процедур определения количественных характеристик надежности;
- возможность приближенных оценок показателей надежности;
- отсутствие ограничений на вид структурной схемы (системы невосстанавливаемые и восстанавливаемые, нерезервированные и резервированные с любым видом резервирования и любой кратностью).

Топологический метод имеет ограничения по применению. К ним относятся: интенсивности отказов и восстановлений элементов являются величинами постоянными; показатели надежности, такие как вероятность безотказной работы и функция готовности, определяются путем применения преобразований Лапласа.

Пусть имеем размеченный граф состояний (рисунок 25):

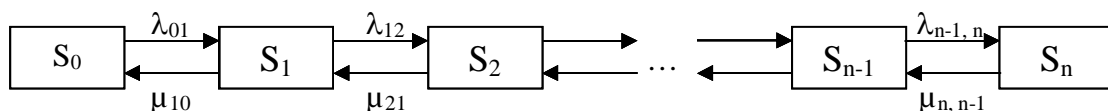


Рисунок 25

Тогда вероятность P_0 состояния S_0 определяется выражением:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} + \frac{\lambda_{01}\lambda_{12}}{\mu_{21}\mu_{10}} + \dots + \frac{\lambda_{01}\lambda_{12} \dots \lambda_{n-1,n}}{\mu_{n,n-1} \dots \mu_{21}\mu_{10}}}.$$

В числителе правой части – всегда единица, знаменатель – сумма, состоящая из единицы и дробей, числители которых – произведения интенсивностей на верхних стрелках, знаменатели – произведения интенсивностей нижних стрелок. Произведения формируются с последовательным увеличением числа сомножителей от одного до n в соответствии с переходами из состояния в состояние.

Вероятность P_1 состояния S_1 равна вероятности состояния P_0 , умноженной на коэффициент, равный второму слагаемому в знаменателе для P_0 , то есть:

$$P_1 = P_0 \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}}.$$

Вероятность P_2 состояния S_2 равна вероятности состояния P_0 , умноженной на коэффициент, равный третьему слагаемому в знаменателе для P_0 , то есть:

$$P_2 = P_0 \frac{\lambda_{01}\lambda_{12}}{\mu_{21}\mu_{10}}.$$

Вероятность n -го состояния равна вероятности состояния P_0 , умноженной на коэффициент, равный последнему слагаемому в знаменателе для P_0 , то есть:

$$P_n = P_0 \frac{\lambda_{01}\lambda_{12} \dots \lambda_{n-1,n}}{\mu_{n,n-1} \dots \mu_{21}\mu_{10}}.$$

Коэффициент готовности является финальной вероятностью того, что объект исправен в произвольный момент времени. На графе это состояние обозначается S_0 . Тогда $K_G = P_0$.

На основании топологического метода получаем:

$$K_G = \frac{1}{1 + \sum_{i=0}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}}.$$

Так как объект имеет одно исправное состояние с номером 0, тогда наработка на отказ:

$$T = \frac{1}{\sum_{i=0}^n \lambda_i} = \frac{1}{\lambda_c}.$$

Из полученного выражения следует – наработка на отказ нерезервированной системы не зависит от числа восстановлений.

Среднее время восстановления равно:

$$T_B = \frac{1 - K_\Gamma}{K_\Gamma} T.$$

Если подставим ранее полученные значения для коэффициента готовности и наработки на отказ, то:

$$T_B = \frac{1}{\lambda_C} \sum_{i=0}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}.$$

Из полученного выражения следует вывод – величина среднего времени восстановления зависит не только от интенсивности восстановления, но и от интенсивности отказов.

Лекция 7

7.1. МАРКОВСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

7.1.1. Общее горячее резервирование

Соединение элементов в электрической принципиальной схеме при общем горячем резервировании и ее структурная схема надежности изображены на рисунке 26.

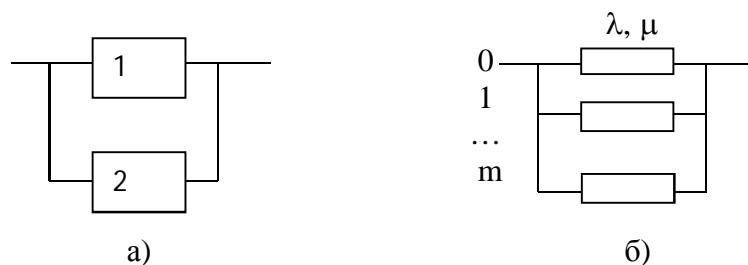


Рисунок 26

а) физическое соединение элементов, б) структурная схема надежности соединения

Рассмотрим методику расчета для случаев ограниченного и неограниченного восстановления.

Ограниченное восстановление (одна бригада).

Размеченный граф состояний для рассматриваемого случая изображен на рисунке 27.

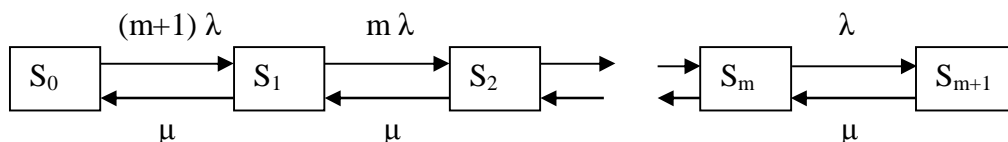


Рисунок 27

Расчетные формулы определения показателей надежности выведены при следующих допущениях: имеем резервирование целой кратности, последствие отказов отсутствует.

Так как коэффициент готовности и коэффициент простоя связаны соотношением $K_G = 1 - K_{II}$, определим коэффициент простоя непосредственно по графу состояний топологическим методом:

$$K_{II} = P_{m+1} = \frac{(m+1)! \cdot \lambda^{m+1}}{(m+1)! \cdot \lambda^{m+1} + \frac{(m+1)! \cdot \lambda^{m+1}}{1!} \cdot \frac{\mu}{\lambda} + \frac{(m+1)! \cdot \lambda^{m+1}}{2!} \cdot \frac{\mu^2}{\lambda^2} + \dots + \mu^{m+1}}$$

После сокращения на $(m+1)! \cdot \lambda^{m+1}$ получим:

$$K_{\Pi} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{1!} + \frac{\gamma^2}{2!} + \dots + \frac{\gamma^{m+1}}{(m+1)!}},$$

где $\gamma = \frac{\mu}{\lambda}$.

После применения соотношения между коэффициентом готовности и коэффициентом простоя получим выражение для коэффициента готовности:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^{m+1} \frac{\gamma^i}{i!}}{\sum_{i=0}^{m+1} \frac{\gamma^i}{i!}}.$$

В соответствии с графом состояний среднее время восстановления равно:

$$T_{\text{В}} = \frac{1}{\mu}.$$

Интенсивность восстановления элементов одинакова, поэтому среднее время восстановления системы равно среднему времени восстановления элемента.

В силу соотношения $T = \frac{K_{\Gamma}}{K_{\Pi}} T_{\text{В}}$ и формул для коэффициента простоя, коэффициента готовности и времени восстановления получим:

$$T = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^{m+1} \frac{\gamma^i}{i!} = T_{\text{В}} \sum_{i=1}^{m+1} \frac{\gamma^i}{i!}.$$

Это соотношение устанавливает зависимость наработки на отказ от кратности резервирования и среднего времени восстановления.

Неограниченное восстановление (несколько бригад).

В случае неограниченного восстановления (число бригад обслуживания равно $m + 1$) размеченный граф состояний имеет вид (рисунок 28):

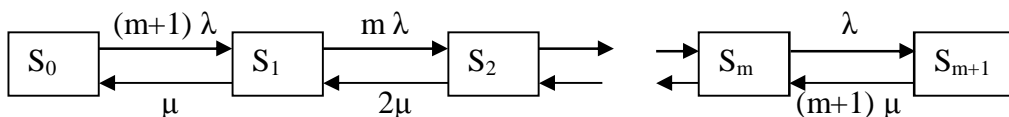


Рисунок 28

В соответствии с размеченным графом состояний можно определить показатели надежности:

– коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = 1 - \frac{\rho^{m+1}}{(1 + \rho)^{m+1}}$$

где $\rho = \lambda/\mu$,

– наработка на отказ

$$T = \frac{(1 + \rho)^{m+1} - \rho^{m+1}}{\lambda(m + 1)\rho^m},$$

– среднее время восстановления

$$T_{\text{В}} = \frac{1}{(m + 1)\mu}.$$

7.1.2. Общее холодное резервирование

Соединение элементов в электрической принципиальной схеме при общем холодном резервировании и ее структурная схема надежности изображены на рисунке 29.

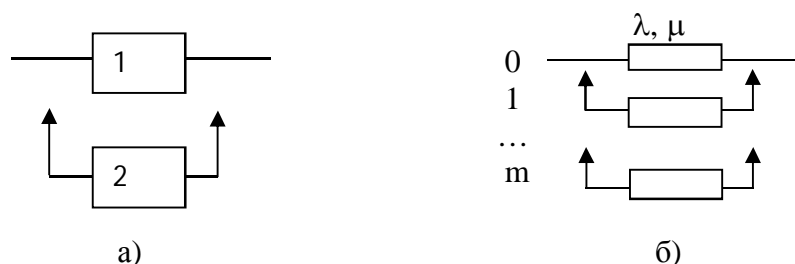


Рисунок 29

а) физическое соединение элементов, б) структурная схема надежности соединения

Рассмотрим методику расчета для случаев ограниченного и неограниченного восстановления.

Ограниченное восстановление (одна бригада)

Размеченный граф состояний для рассматриваемого случая изображен на рисунке 30.

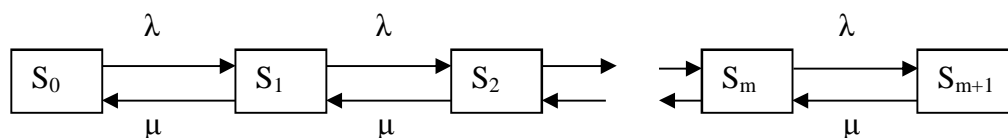


Рисунок 30

В соответствии с размеченным графом состояний показатели надежности равны:

– коэффициент готовности:

$$K_{\Gamma} = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_m = \frac{\mu^{m+1} + \lambda\mu^m + \lambda^2\mu^{m-1} + \dots + \lambda^m\mu}{\mu^{m+1} + \lambda\mu^m + \lambda^2\mu^{m-1} + \dots + \lambda\mu^m + \lambda^{m+1}}$$

$$= \frac{1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^m}{1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^m + \rho^{m+1}}$$

или

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=0}^m \rho^i}{\sum_{i=0}^{m+1} \rho^i}$$

где $\rho = \lambda/\mu$,

– среднее время восстановления:

$$T_B = \frac{1}{\mu}$$

– наработка на отказ:

$$T = \frac{K_{\Gamma}}{K_{\Pi}} T_B = T_B \sum_{i=1}^{m+1} \gamma^i,$$

или

$$T = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^m \gamma^i.$$

Неограниченное восстановление (несколько бригад).

В случае неограниченного восстановления число ремонтных бригад равно $m + 1$. Размеченный граф состояний на рисунке 31.

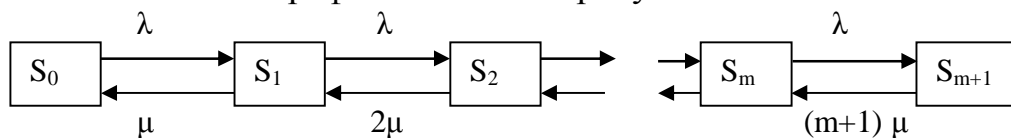


Рисунок 31

На основании графа состояний и правила топологического метода запишем выражения для:

– коэффициента простоя:

$$K_{\Pi} = P_{m+1} = \frac{\lambda^{m+1}}{(m+1)! \mu^{m+1} + \frac{(m+1)!}{1!} \mu^m \lambda + \frac{(m+1)!}{2!} \mu^{m-1} \lambda^2 + \dots + (m+1) \mu \lambda^m + \lambda^{m+1}}$$

$$= \frac{\frac{\rho^{m+1}}{(m+1)!}}{1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^m}{m!} + \frac{\rho^{m+1}}{(m+1)!}},$$

где $\rho = \lambda/\mu$;

– коэффициента готовности:

$$K_{\Gamma} = 1 - K_{\Pi} = \frac{1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^m}{m!}}{1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^m}{m!} + \frac{\rho^{m+1}}{(m+1)!}} = \frac{\sum_{i=0}^m \frac{\rho^i}{i!}}{\sum_{i=0}^{m+1} \frac{\rho^i}{i!}};$$

– среднего времени восстановления:

$$T_{\text{В}} = \frac{1}{(m+1)\mu};$$

– наработки на отказ:

$$T = \frac{K_{\Gamma}}{K_{\Pi}} T_{\text{В}} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^m \frac{m!}{(m-i)!} \gamma^i,$$

где $\gamma = \frac{\mu}{\lambda}$.

Сравнительный анализ рассмотренных методов резервирования систем с восстановлением показывает:

– существенно повышается коэффициент готовности и наработка на отказ. Значительное повышение надежности получается уже при кратности резервирования $m = 1$;

– при дублировании с восстановлением среднее время работы между отказами повышается в разы в случае постоянного резервирования, а в случае резервирования замещением в десятки раз;

– показатели надежности тем выше, чем выше кратность резервирования и число обслуживающих бригад.

Лекция 8

8.1. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Отказы в системах железнодорожной автоматики и телемеханики возникают под воздействием разнообразных факторов. Поскольку каждый фактор в свою очередь зависит от разнообразных причин, то отказы СЖАТ и их элементов относятся к случайным событиям, а время работы до возникновения отказов – к случайным величинам. Таким образом, при анализе надежности объектом исследования являются случайные события и случайные величины.

Случайная величина – величина, которая в результате опыта может принимать то или иное значение, заранее не известно, какое именно. Случайная величина может быть либо дискретной (число отказов за время t , число отказавших элементов при испытаниях заданного объема и т. д.), либо непрерывной (время работы изделия до отказа, время восстановления работоспособности и т. д.).

Случайное событие – событие, которое в результате опыта может произойти или не произойти. Случайные события (отказы, восстановления и т. д.) образуют случайные потоки и случайные процессы.

Поток событий – последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то отрезки времени. Например, отказы восстанавливаемого объекта образуют поток событий отказов и восстановлений. Под воздействием потока отказов и восстановлений объект может находиться в различных состояниях. Переход объекта из одного состояния в другое представляет собой случайный процесс.

Соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями, называется **законом распределения случайной величины**.

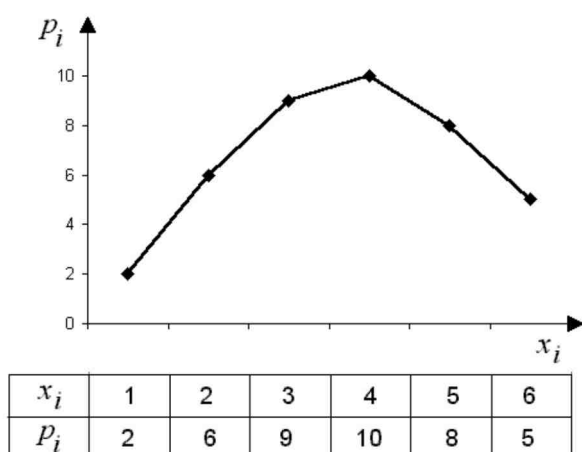


Рисунок 32

Наиболее простой формой задания закона распределения дискретной случайной величины является статистический ряд распределения, представленный в виде таблицы или графика-полигона (рисунок 32).

Для непрерывной случайной величины задается **функция распределения $F(x)$** , характеризующая вероятность события $X \leq x$ (т. е. вероятность того, что случайная величина не превышает заданного значения). График функции распределения имеет вид неубывающей кривой, значения которой изменяются в диапазоне от 0 до 1 (рисунок 33 а).

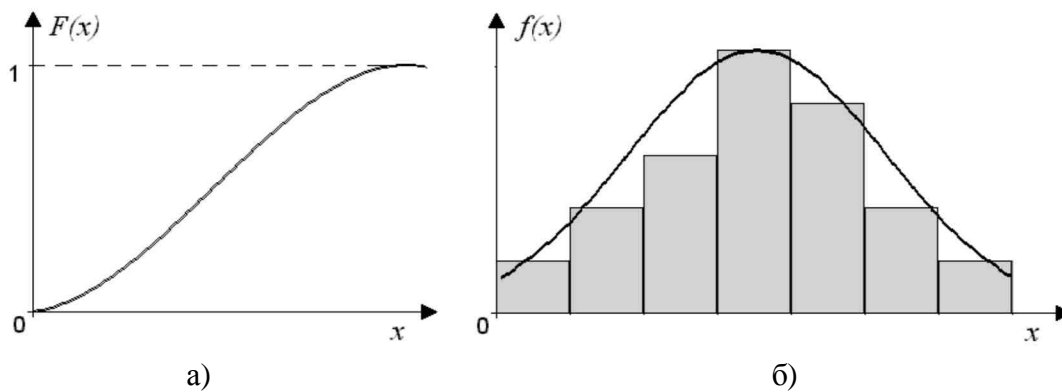


Рисунок 33.

График функции распределения (а), гистограмма и кривая распределения (б) непрерывной случайной величины

Кроме того, для характеристики случайных величин широко используется плотность вероятности —, графически представляемая гистограммой или кривой распределения (рисунок 33 б).

При определении вероятности безотказной работы системы ЖАТ устанавливают закон распределения наработки на отказ и времени восстановления основных элементов.

В теории надежности используются следующие законы распределения случайных величин:

– для дискретных случайных величин – биномиальный закон, закон Пуассона;

– для непрерывных случайных величин – экспоненциальный закон, нормальный закон (распределение Гаусса), закон Вейбулла, χ^2 – распределение, логарифмически-нормальное распределение, гамма-распределение и т. д.

Закон распределения Пуассона описывает поведение дискретного случайного события за время t . В соответствии с законом Пуассона вероятность появления случайного события n раз за время t равна:

—————

где λ – интенсивность случайного события.

Распределение Пуассона обладает следующими свойствами:

- математическое ожидание числа событий за время t равно λt ;
- среднее квадратическое отклонение числа событий

Характерный признак распределения Пуассона – равенство математического ожидания и дисперсии ($D = \lambda t$). Это свойство используется для проверки степени соответствия опытного распределения с теоретическим распределением Пуассона.

Очень часто законом Пуассона пользуются, когда необходимо определить вероятность того, что в изделии за заданное время произойдет один, два, три и т. д. отказов.

Экспоненциальный закон распределения применяется для анализа сложных систем, где преобладают внезапные отказы. Главная особенность закона – независимость интенсивности потока отказов от времени эксплуатации $\lambda = const$.

Если имеет место экспоненциальный закон распределения:

– вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\lambda t};$$

– вероятность отказов

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t};$$

– частота отказов

$$f(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = \lambda P(t) = \lambda e^{-\lambda t};$$

– интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}.$$

– наработка до отказа

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda};$$

– дисперсия времени работы до возникновения отказа

$$D(t) = \int_0^{\infty} (t - T_0)^2 f(t) dt = \frac{1}{\lambda^2};$$

– среднее квадратическое отклонение времени работы до отказа

$$\sigma(t) = T_0.$$

Равенство среднее квадратическое отклонения времени работы до отказа – характерный признак экспоненциального распределения.

Графики зависимостей показателей надежности от времени, характеризующие экспоненциальный закон, имеют вид (рисунок 34):

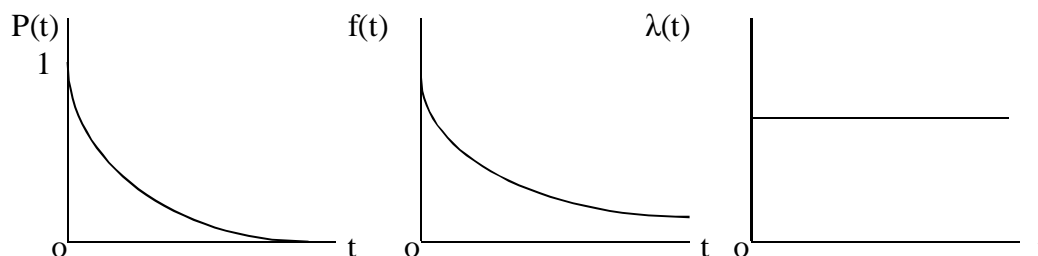


Рисунок 34

При экспоненциальном законе математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение совпадают с параметром закона ($1/\lambda$). Это свойство используют для проверки гипотезы об экспоненциальном характере изменения надежности.

Нормальный закон распределения (распределение Гаусса) используется, когда доля внезапных отказов мала. В этом случае преобладают постепенные (параметрические) отказы.

Нормальному распределению подчиняются ошибки измерения деталей, ошибки измерения временных интервалов и т. д.

Для нормального распределения основные характеристики равны:

– вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}\right] dt;$$

– частота отказов

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}\right],$$

здесь σ , T – параметры нормального распределения, соответственно среднее квадратическое отклонение времени наработку на отказ и наработка на отказ;

– параметр потока отказов

$$\omega(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}\Phi\left(\frac{T-t}{\sigma}\right)} \exp\left[\frac{(T-t)^2}{2\sigma^2}\right],$$

где

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz.$$

$\Phi(z)$ функция Гаусса (интеграл вероятности) принимается по справочным данным.

Графические зависимости для основных характеристик надежности при нормальном законе распределения приведены на рисунке 35.

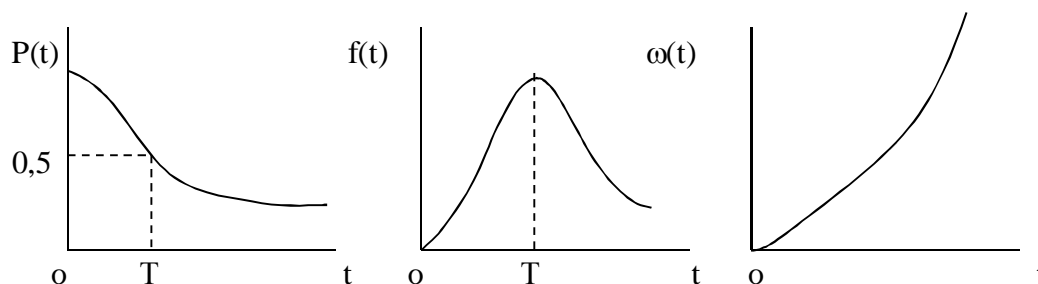


Рисунок 35

Параметр потока отказов монотонно увеличивается с течением времени, что характеризует старение элементов.

Распределение Вейбулла применяется для анализа надежности технических систем в период времени их приработки.

Для рассматриваемого распределения:

– вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b};$$

– частота отказов

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b};$$

– интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}.$$

Здесь a и b – параметры масштаба и формы распределения Вейбулла.

Графики распределения показателей надежности Вейбулла приведены на рисунке 36.

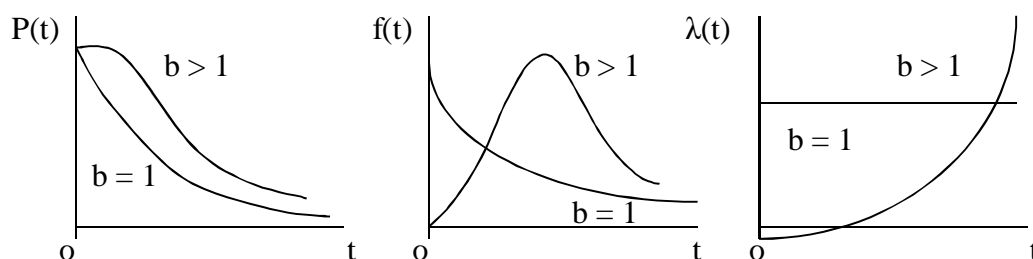


Рисунок 36

В зависимости от величины b закон изменяет свой вид, что позволяет описывать как внезапные, так и приработочные и деградационные (износные) отказы. При $b = 1$ распределение Вейбулла превращается в экспоненциальное распределение, описывающее внезапные отказы. При $b > 2$ закон хорошо описывает процессы износа и старения, когда интенсивность отказов со временем возрастает. При $b < 1$ закон описывает процесс приработки, когда интенсивность отказов со временем уменьшается.

8.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА И ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Вид функции распределения наработки на отказ заранее не известен и должен определяться по опытным данным. При выявлении закона распределения соблюдается следующий порядок:

- получают и готовятся для анализа экспериментальные данные;
- осуществляется построение гистограммы количественной характеристики надежности;
- проверяется допустимость предполагаемого закона распределения, используя критерии согласия (χ^2 -Пирсона, Колмогорова и др.).

Критерий согласия χ^2 -Пирсона основан на мере расхождения между

теоретическими вероятностями попаданий в частичные интервалы и наблюдаемыми частотами p_i^* интервального статистического ряда.

Предположим, произведено n независимых опытов, в каждом из которых случайная величина X приняла определенное значение. Результаты опытов сводятся в k разрядов и оформляются в виде статистического ряда (таблица 3).

Таблица 3

	1	2	3	...	k
J_i	X_0X_1	X_1X_2	X_2X_3	...	$X_{k-1}X_k$
p_i^*	p_1^*	p_2^*	p_3^*	...	p_k^*

Здесь $p_1^*, p_2^*, p_3^*, \dots, p_k^*$ статистическая вероятность попадания случайной величины в каждый из разрядов.

На основании данных таблицы производится построение гистограммы (рисунок 37).

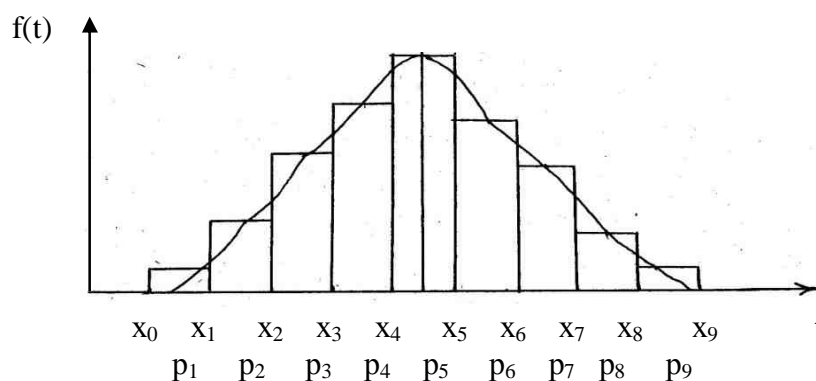


Рисунок 37

Гистограмма аппроксимируется кривой. Затем проверяется, согласуются ли экспериментальные данные с гипотезой о том, что случайная величина X имеет закон распределения заданный функцией распределения $F(x)$ или плотностью распределения $f(x)$. Зная теоретический закон распределения, можно найти теоретические вероятности попадания случайной величины в каждый из разрядов $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k$.

Проверяя согласованность теоретического и статистического распределений, исходят из меры расхождения между теоретическими вероятностями p_i и наблюдаемыми частотами p_i^* . Мерой расхождения выбирают сумму квадратов разности вероятностей $(p_i^* - p_i)^2$, взятых с некоторыми «весами» C_i :

$$U = \sum_{i=1}^k C_i (P_i^* - P_i)^2.$$

Учитывая, что

$$P_i^* = \frac{m_i}{n}, \quad C_i = \frac{n}{P_i}$$

можно записать статистику в виде

$$U = \chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i},$$

где m_i – число попаданий случайной величины в i -й интервал; n – число разрядов.

Для распределения χ^2 составлены специальные таблицы. Пользуясь ими, для каждого значения χ^2 и числа степеней свободы r определяют вероятность того, что величина, распределенная по закону χ^2 , превзойдет это значение.

Если эта вероятность мала, то теоретическое и статистическое распределения не согласуются. Надо искать новое, более приемлемое распределение.

Если вероятность сравнительно велика, можно признать расхождения между теоретическим и статистическим распределением несущественным и отнести их за счет случайных причин. Можно применять соотношения для определения показателей надежности.

С другой стороны, очень большая вероятность $p = 0,99$ не есть критерий идеальной согласованности распределения. В этом случае расхождения слишком малы, чтобы признать их правдоподобными.

Критерий Колмогорова основан на мере расхождения между теоретическим и статистическим распределением. В качестве меры расхождения Колмогоров предложил использовать максимальное значение модуля разности между статистической функцией распределения $F^*(x)$ и теоретической $F(x)$:

$$D = \max | F^*(x) - F(x) |.$$

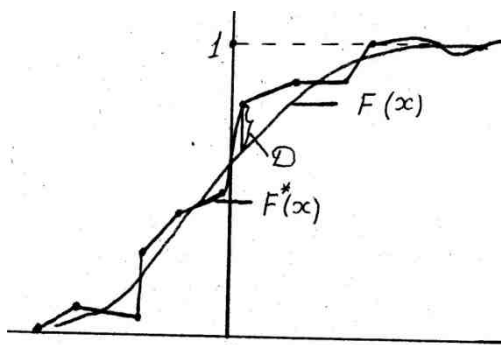


Рисунок 38

Строится статистическая функция распределения $F^*(x)$. Она аппроксимируется теоретической функцией распределения $F(x)$ (рисунок 38). Определяется максимум D модуля разности между ними. Определяется величина $D\sqrt{k} = \lambda$, где k – общее количество экспериментальных точек.

По специальной таблице находится значение вероятности $P(\lambda)$. Вероятность характеризует, насколько случайная величина X распределена по теоретическому закону $F(x)$.

Если вероятность $P(\lambda)$ мала, теоретическое и статистическое распределения не согласуются. Требуется искать другое теоретическое распределение. При сравнительно больших $P(\lambda)$ теоретическое и статистическое распределение согласуются и теоретическое распределение можно использовать для определения показателей надежности.

Лекция 9

9.1. ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Критерий предельного состояния – признак или совокупность признаков, установленные нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией.

В зависимости от условий эксплуатации, для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния. К ним относят:

- недопустимое увеличение вероятности опасного отказа;
- отказ, ухудшение функциональных свойств;
- вредное влияние не потерявшего работоспособности элемента или блока на сопряженные или смежные с ним элементы;
- моральное старение.

К показателям долговечности объектов относят:

Технический ресурс – наработка объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до наступления предельного состояния.

Технический ресурс представляет собой запас возможной наработки объекта. Для невосстанавливаемых объектов он совпадает с наработкой до отказа. Для восстанавливаемых объектов различают доремонтный, межремонтный, послеремонтный и полный (до списания) ресурсы.

Средний ресурс – математическое ожидание технического ресурса.

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой применение объекта должно быть прекращено.

Предприятие-изготовитель или ремонтное предприятие могут установить **гарантийный ресурс**, в течение которого гарантируется выполнение установленных требований к объекту при соблюдении правил эксплуатации, хранения и транспортировки.

Срок службы – календарная продолжительность (дни, месяцы, годы) работы от начала эксплуатации объекта или возобновления эксплуатации после ремонта до перехода в предельное состояние.

Для невосстанавливаемых объектов технический ресурс совпадает с наработкой до отказа.

Для восстанавливаемых объектов различают доремонтный, межремонтный, послеремонтный и полный (до списания) сроки службы.

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

Назначенный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта, при достижении которой применение его по назначению должно быть прекращено.

Предприятие изготовитель или ремонтное предприятие могут установить **гарантийный срок службы**, в течение которого гарантируется выполнение установленных требований к объекту при соблюдении правил эксплуатации, хранения и транспортировки.

9.2. ПОКАЗАТЕЛИ СОХРАНЯЕМОСТИ

Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

В процессе хранения и транспортирования объекты подвергаются неблагоприятным воздействиям. В результате после хранения и (или) транспортирования объект может оказаться в неработоспособном и даже в предельном состоянии. Сохраняемость объекта характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности его хранения и транспортирования.

К показателям сохраняемости относят:

Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение и после которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции.

Различают срок сохраняемости до ввода в эксплуатацию и срок сохраняемости в период эксплуатации.

Назначенный срок хранения – календарная продолжительность хранения, при достижении которой хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

Основной численной мерой сохраняемости является вероятность того, что за определенный интервал времени и в заданных условиях хранения исправность технического устройства не нарушится или отказ не произойдет.

К числу количественных характеристик сохраняемости относят:

– вероятность исправного состояния при хранении

$$P(t_x) = \frac{N - n(t_x)}{N},$$

где $n(t_x)$ – число технических устройств, пришедших в неисправное состояние в процессе хранения; N – общее число однотипных технических устройств находящихся на хранении с момента $t_x = 0$;

– плотность вероятности появления неисправности при хранении:

$$f_x(t) = \frac{n(\Delta t_x)}{N \Delta t_x},$$

где $n(\Delta t_x)$ – число неисправных устройств в интервале времени хранения,
 Δt_x – интервал времени хранения;
 – интенсивность появления неисправности при хранении

$$\lambda_x(t) = \frac{n(\Delta t_x)}{N(t_x)\Delta t_x}$$

где $N(t_x)$ – среднее число исправных технических устройств, находящихся на хранении в течение интервала времени хранения Δt_x ;
 – среднее время исправного состояния устройств при хранении

$$T_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{xi}$$

где t_{xi} – время появления неисправности i -го устройства в период хранения.

9.3. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность технических объектов существенно сказывается на экономических показателях их эксплуатации. Повышение безотказности и долговечности с одной стороны приводит к увеличению материальных затрат, затрат на проектирование и изготовление, а с другой – к снижению эксплуатационных издержек.

Существует оптимальный уровень надежности с минимальными суммарными затратами на изготовление и эксплуатацию технической системы.

Экономический эффект от эксплуатации объекта (рисунок 39) изменяется во времени под влиянием трех основных факторов:

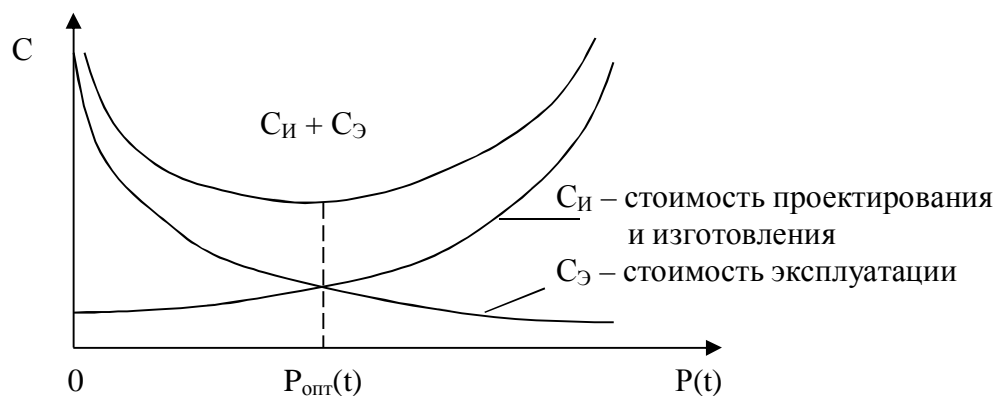


Рисунок 39

– затрат на изготовление $C_{И}$ (включая проектирование, монтаж, отладку и т. д.);

– эксплуатационных затрат $C_{Э}$ (включая техническое обслуживание, ремонт, профилактические мероприятия и др.);

– прибыли C_{Π} полезного эффекта от эксплуатации.

Первые две величины снижают общий баланс эффективности эксплуатации, третья – увеличивает (рисунок 40). Затраты на изготовление не изменяются от момента начала эксплуатации до списания. Эксплуатационные затраты имеют тенденцию к все более быстрому росту из-за процессов старения и износа. Изменения прибыли во времени имеют тенденцию к уменьшению, так как частые простои при ремонте и техническом обслуживании снижают производительность объекта.

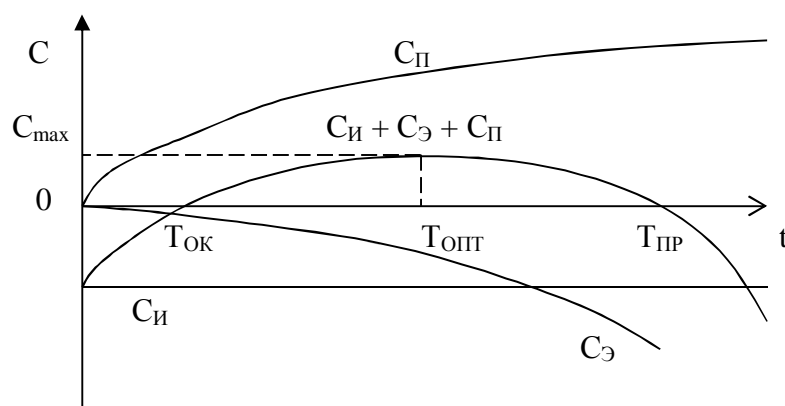


Рисунок 40

Поэтому кривая суммарной эффективности $C = C_{И} + C_{Э} + C_{П}$ имеет максимум C_{max} и дважды пересекает ось времени. Продолжительность экономически целесообразного срока эксплуатации лежит между двумя точками: сроком окупаемости $T_{ок}$ и предельным сроком $T_{пр}$.

После наступления предельного срока эксплуатация объекта убыточна.

Таким образом, показатели надежности (вероятность безотказной работы, срок службы и др.) связаны с экономическими показателями (эксплуатационными затратами, прибылью и др.). Так как экономические показатели характеризуют сразу несколько свойств надежности, то их можно считать комплексными.

Экономическими критериями надежности могут служить:

– удельные затраты на изготовление и эксплуатацию

$$K_{э} = \frac{C_{И} + C_{Э}}{T_{э}},$$

где $C_{И}$ – стоимость изготовления, $C_{Э}$ – затраты на эксплуатацию, ремонт и обслуживание, $T_{э}$ – период целесообразной эксплуатации.

Коэффициент эксплуатационных издержек $K_{из}$ – соотношение между стоимостью изготовления и эксплуатации объекта:

$$K_{из} = \frac{C_{И}}{C_{И} + C_{Э}}.$$

Более высокая надежность объекта достигается за счет дополнительных затрат. Общие затраты на изготовление объекта складываются из постоянных затрат $C_{ПЗ}$, не зависящих от уровня надежности, и переменной составляющей C_H , которая обусловлена требованиями надежности:

$$C_{И} = C_{ПЗ} + C_H.$$

Для прогнозирования значения величины C_H , которая называется **ценой надежности**, обычно используется сравнение с прототипом на основании эмпирических зависимостей вида:

$$C_H = C_{H пр} \left(\frac{T}{T_{пр}} \right)^a,$$

где $C_{H пр}$ – цена надежности прототипа (аналога), T и $T_{пр}$ – наработка на отказ или средний срок службы проектируемого объекта и прототипа, a – эмпирический показатель, характеризующий уровень производства.

9.4. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ ОБЪЕКТОВ

В период функционирования объектов может возникать постепенный отказ, который характеризуется медленным изменением к значениям установленных допусков одного или нескольких параметров объекта в течение достаточно длительного времени в результате износа, старения и т. д.

Для установления факта соответствия объекта установленным требованиям назначают один или несколько определяющих параметров $X(t)$. Определяющий параметр служит мерой качества объекта. В общем случае определяющий параметр может быть векторным $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t) \dots x_n(t)\}$.

Параметр $X(t)$ под воздействием случайных и детерминированных факторов (износа, старения, разрегулирования и т. д.) изменяется в процессе эксплуатации (хранения) объекта и достигает предельного (критического) значения. После этого объект считается неработоспособным. Происходит отказ.

Область изменения параметра $\{X_{макс}, X_{мин}\}$, в пределах которого состояние объекта считается работоспособным, называется **рабочей областью** или **полем допуска** (рисунок 41).

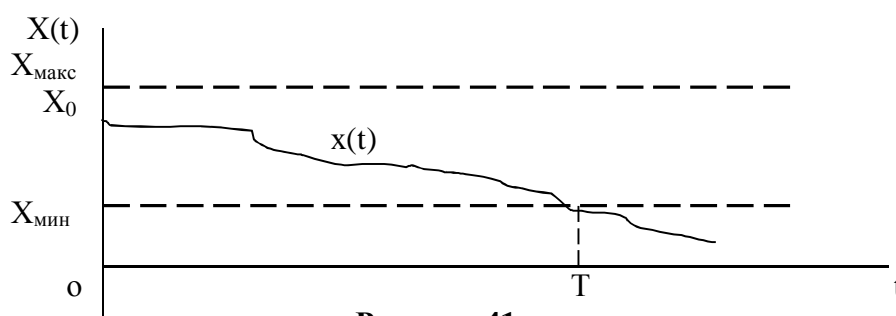


Рисунок 41

Пока значение определяющего параметра находится внутри поля допуска, объект считается работоспособным. Точка пересечения реализации определяющего параметра с границей поля допуска считается событием отказа и соответствует наработке объекта до отказа T .

Математическим критерием постепенного отказа в данном случае будет нарушение неравенства $X_{мин} < X(t) < X_{макс}$, а количественной мерой надежности – вероятность выполнения этого условия в течение времени T – наработки на отказ.

Мы рассмотрели процесс изменения одиночного определяющего параметра у объекта. В определенных условиях характеристики параметрической надежности могут быть получены на основе знания интегральной или дифференциальной функции распределения определяющего параметра $X(t)$ в начальный момент времени $P_0(X_0, t_0)$ или $f_0(X_0, t_0)$ и функции его изменения во времени $X(t) = \varphi(X_0, t)$.

Рассмотрим основные этапы формирования закона распределения времени безотказной работы объекта $f(t)$ (рисунок 42).

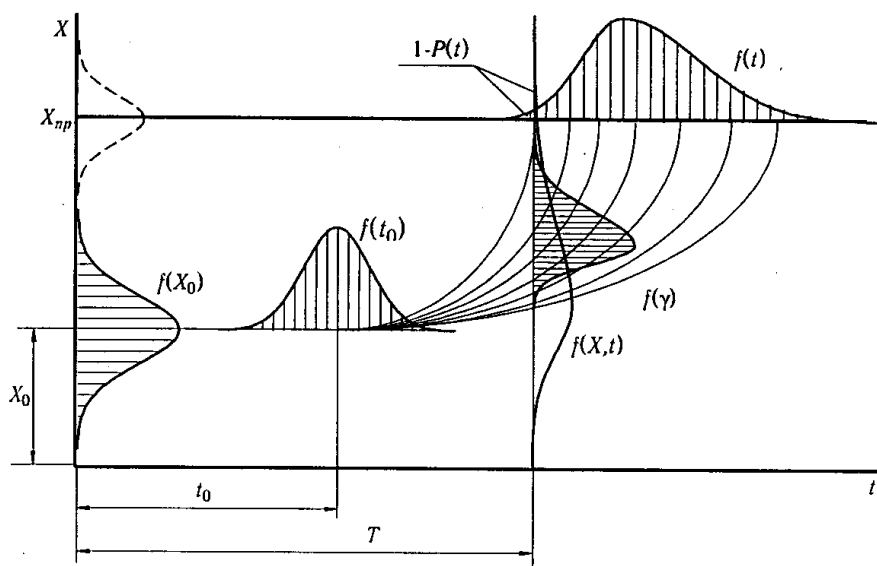


Рисунок 42

В начале эксплуатации имеет место разброс начального значения определяющего параметра $f(X_0)$ относительно своего математического ожидания X_0 . Это может быть связано с нестабильностью свойств материалов и технологии изготовления, различными внутренними и внешними причинами. В процессе эксплуатации объекта определяющий параметр под воздействием происходящих процессов начинает изменяться. Изменение параметра может начаться через некоторый промежуток времени от начала эксплуатации t_0 . Этот промежуток также является случайной величиной с распределением $f(t_0)$ относительно своего математического ожидания, связанный, например, с процессом накопления повреждений.

Скорость изменения определяющего параметра $\gamma = dX/dt$ после периода t_0 зависит от природы процессов износа, старения или разрегулирования. Она в общем случае также является случайной величиной.

В результате всех этих процессов и явлений происходит формирование закона распределения $f(X,t)$, определяющего вероятность выхода параметра X за границу поля допуска, то есть вероятность отказа $Q(t) = 1 - P(t)$.

Рассматриваемая схема описывает процесс возникновения параметрического отказа в общем виде. В конкретном случае модель должна отражать конструктивные особенности и условия эксплуатации конкретных элементов технических систем.

Скорость изменения определяющего параметра $\gamma = dX/dt$ может быть определена экспериментально или на основании анализа моделей физико-химических процессов, происходящих в элементе при эксплуатации.

Для большинства элементов скорость изменения определяющего параметра постоянна на всем периоде их эксплуатации:

$$X = X_0 + \gamma t.$$

Наработка элемента до отказа T является функцией двух независимых случайных величин: начального значения параметра X_0 , скорости изменения параметра γ . Очевидно, что $T = (X_{np} - X_0)/\gamma$. Это справедливо, если в процессе изменения определяющего параметра $X_0 < X_{np}$. Хотя возможен и обратный случай, когда величина определяющего параметра имеет ограничение снизу, однако модель отказа при этом принципиально не изменяется.

Если аргументы X_0 и γ распределены по нормальному закону, то применив к последнему уравнению операцию математического ожидания $M[X] = M[X_0] + M[\gamma]t$, получим среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_{X_0}^2 + (\sigma_\gamma t)^2}.$$

Учитывая, что вероятность безотказной работы элемента $P(t)$ равна вероятности того, что в течение времени t параметр X не выйдет за заданное значение X_{max} , получим

$$P(t) = P(X \leq X_{max}) = 0,5 + \Phi \left[\frac{X_{max} - (m_{X_0} + m_\gamma t)}{\sqrt{\sigma_{X_0}^2 + (\sigma_\gamma t)^2}} \right],$$

где Φ – интеграл вероятности.

Лекция 10

10.1. ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Оценка и контроль показателей надежности объектов и их элементов осуществляется по результатам испытаний или наблюдений в процессе эксплуатации. Целью испытаний на надежность является установление уровня надежности. Основная задача испытаний на надежность – получение информации о работоспособности объектов в конкретных условиях эксплуатации, применения или использования.

В зависимости от целей и характера получаемой информации технические объекты подвергаются функциональным испытаниям и испытаниям на надежность. Функциональные испытания проводятся с целью проверки способности объекта выполнять работу, для которой оно предназначено. Испытания на надежность проводятся для определения или оценки показателей надежности, таких как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

В зависимости от исследуемых свойств надежности испытания делят на:

Испытания на долговечность (ресурсные испытания): по целям и видам испытаний (доводочные, предварительные, приемочные, определительные, контрольные, исследовательские, эксплуатационные), по объектам испытаний (испытания деталей, элементов, узлов, агрегатов, объекта и системы в целом), по темпам и срокам проведения (нормальные и ускоренные), по способу проведения испытаний (стендовые, эксплуатационные, полигонные), по критериям предельного состояния (до полного отказа, до изменения параметров).

Испытания на безотказность – направленные ресурсные испытания, проводимые по специальной методике при специально подобранных режимах с целью вызвать отказы определенного вида.

Испытания на ремонтпригодность проводятся с целью определения показателей ремонтпригодности по трем основным направлениям: техническому обслуживанию, текущему и капитальному ремонтам.

По каждому направлению оцениваются трудоемкость, продолжительность и стоимость операций. Задача решается двумя путями: имитацией и наблюдениями при испытаниях и эксплуатации.

Испытания на сохраняемость проводятся с целью определения показателей сохраняемости.

В зависимости от целей и характера получаемой информации, испытания на надежность делятся на определительные и контрольные.

10.2. ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Цель определительных испытаний на надежность – определение количественных численных значений показателей надежности.

По методам и стратегии проведения и способам обработки результатов нормировано 16 планов испытаний, которые определены в ГОСТ 27.410-87.

Обозначение плана испытаний состоит из трех символов, заключенных в скобках. Например [NUT], [NUT], (NMr) и т. д.

Первый символ обозначения плана определяет объем выборки изделий для испытаний. Второй символ указывает на возможность восстановления или замены отказавших изделий в процессе испытаний. Третий символ указывает на принцип окончания испытаний.

Например: [N = 120, M, r = 16] обозначает испытания 120 изделий с восстановлением после отказов до тех пор, пока число отказов достигнет 16. Квадратные скобки означают одновременное, круглые скобки – неодновременное поступление изделий после отказов.

Распространенными планами определительных испытаний являются:

План 1. На испытание ставятся N изделий. Отказавшие изделия не восстанавливаются. Испытания продолжаются до отказа всех изделий. В качестве статистического среднего значения времени работы до отказа:

$$T_o = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N},$$

где t_i – время работы каждого изделия до отказа.

Недостаток рассмотренного плана испытаний – значительная длительность времени испытаний и необходимость поставить на испытание большое количество изделий.

План 2. На испытание ставятся N изделий. Отказавшие изделия не восстанавливаются. Испытания продолжаются либо до заданного времени t , либо до получения заданного числа отказов n .

План 3. На испытание ставятся N изделий. Отказавшие изделия восстанавливаются. Испытания продолжаются либо до заданного времени t , либо до получения заданного числа отказов n . К таким испытаниям предъявляется требование стабильности показателей надежности до первого и последующего отказов.

Использование среднего значения показателя надежности позволяют решать инженерные задачи – сравнивать оценки надежности, осуществлять расчеты надежности сложных изделий и т. п. Но средние значения содержат мало информации о случайной величине. Это вынуждает искать более информативные способы обработки результатов испытаний. Подробную информацию о надежности получают по доверительному интервалу возможных значений показателя надежности, которым накрывается определяемый показатель с заданной вероятностью (рисунок 43).

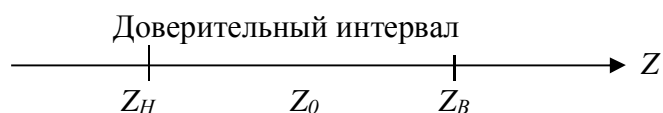


Рисунок 43

На рисунке обозначены: Z_H , Z_B – нижняя и верхняя границы двухстороннего доверительного интервала; Z_0 – искомая характеристика надежности.

Интервал, заключенный между верхней и нижней границами, называется доверительным. Доверительный интервал с заданной доверительной вероятностью γ накрывает истинное значение искомого показателя. Доверительный интервал характеризует значение ошибки при оценке показателя надежности, доверительная вероятность – достоверность оценки. Кроме двустороннего доверительного интервала могут применяться односторонние доверительные интервалы.

Рассмотрим применение доверительного интервала для оценки средней наработки на отказ, если случайная величина распределена по закону χ^2 -распределения (рисунок 44).

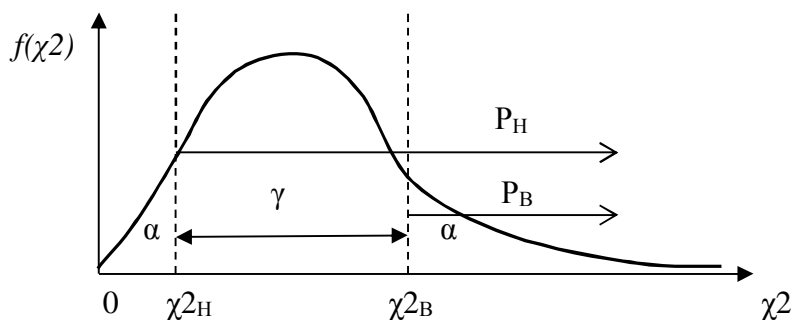


Рисунок 44

Если известно, что случайная величина распределена по закону χ^2 -распределения, то из площади, ограниченной $f(\chi^2)$, «вырезается» площадь, соответствующая заданной доверительной вероятности γ , так чтобы остающиеся слева и справа части α были одинаковы. Левая и правая границы «вырезанной» площади соответствует нижнему и верхнему значениям доверительного интервала.

Границы доверительного интервала для средней наработки на отказ определяются выражением $T_{0H} \leq T_0 \leq T_{0B}$, где

$$T_{0H} = \frac{2t_p}{\chi^2_B} \text{ при } k = 2n + 2; \quad T_{0B} = \frac{2t_p}{\chi^2_H} \text{ при } k = 2n.$$

Здесь χ^2_H , χ^2_B – нижнее и верхнее значения χ^2 ; $2t_p$ – удвоенное значение суммарной наработки исследуемого изделия. Значения χ^2_H и χ^2_B определяются по таблице χ^2 -распределения.

Входными величинами в таблицу являются:

- k – число степеней свободы при n числе зафиксированных отказов;
- P_H и P_B – вероятности того, что χ^2_n и χ^2_B будут больше значений χ^2 , указанных в таблице.

Значения P_H и P_B определяются из распределения $f(\chi^2)$:

$$P_H = \gamma + \frac{1 - \gamma}{2} = \frac{1 + \gamma}{2}; \quad P_B = \frac{1 - \gamma}{2}.$$

Значение средней наработки на отказ равно

$$T_{CP} = \frac{2t_p}{\chi^2_{CP}} \quad \text{при } k = 2n + 2; \gamma = 0,5.$$

10.3. КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Контрольные испытания на надежность служат средством контроля надежности изделий по некоторому заданному косвенному признаку. Такими косвенными признаками могут быть:

- отсутствие отказов при проведении испытаний на протяжении заданного времени. В этом случае контрольные испытания называются испытаниями на числе допустимых отказов, равных нулю;

- предельное число допустимых и недопустимых отказов для последовательных интервалов времени. В этом случае контрольные испытания называются испытаниями, основанными на последовательном анализе.

Целью контрольных испытаний на надежность является проверка соответствия фактического уровня надежности партии изделий требованиям, которые установлены в нормативно-технической документации. По результатам испытаний партия изделий объявляется либо годной для приемки, либо браком. В ходе испытаний проверяют и выбирают одну из двух взаимоисключающих гипотез:

- прямая гипотеза – надежность партии соответствует установленным требованиям;

- обратная гипотеза – надежность партии не соответствует установленным требованиям.

Третий возможный исход «допустимая партия» в зависимости от условий испытаний может быть присоединен к любому из ранее приведенных гипотез.

10.3.1. Испытания, основанные на числе допустимых отказов, равных нулю

На испытания продолжительностью t_H часов ставятся N изделий. Если при испытаниях продолжительностью t_H не было отказов $n = 0$, то изделия считаются удовлетворяющими требованиям надежности.

Расчетом определяются либо продолжительность испытаний при заданном числе испытываемых изделий, либо число испытываемых изделий при заданном времени испытаний:

$$t_{\text{И}} = \frac{t_{\text{P}}}{N}, \quad N = \frac{t_{\text{P}}}{t_{\text{И}}}$$

здесь t_{P} – общая наработка изделий в период испытаний.

Величину требуемой наработки, если имеет место χ^2 -распределение, определяют из выражения:

$$t_{\text{P}} = 0,5 \cdot T_{\text{H}} \cdot \chi^2_{\text{B}}, \quad \text{при } k = 2; \gamma_{\text{H}} = 1 - \gamma,$$

здесь T_{H} – нижнее значение наработки, которое подтверждается испытаниями при отсутствии отказов; χ^2 – значение, соответствующее доверительной вероятности при числе отказов, равном нулю, k – число степеней свободы, γ – доверительная вероятность.

Недостатком рассмотренного метода является длительность проведения испытаний, а также необходимость ставить на испытания большое количество однотипных изделий для получения достоверных результатов

10.3.2. Испытания, основанные на последовательном анализе

Этот метод позволяет сократить время на проведение контрольных испытаний, если использовать следующий подход к планированию:

1. Не планировать заранее продолжительность испытаний, а разбить их на ряд последовательных этапов. На каждом этапе проводить анализ полученных результатов и принимать одно из трех решений:

– прекратить испытания, так как есть основания считать, что изделия удовлетворяют требованиям надежности;

– прекратить испытания, так как есть основания считать, что изделия не удовлетворяют требованиям надежности;

– продолжить испытания, так как нет оснований для вывода о надежности изделий.

2. В ходе обработки результатов испытаний в конце каждого этапа проверять гипотезу о принадлежности изделий к той или иной группе по уровню надежности.

При испытаниях на надежность рекомендуется устанавливать две группы изделий по уровню надежности. **Первая.** К ней относят изделия, браковка которых может быть произведена с вероятностью a . Эта вероятность получила название ошибки первого рода или риска поставщика. Ошибка первого рода имеет место тогда, когда хорошая партия, изделия которой имеют уровень надежности, равный или лучше заданного, бракуется по результатам испытаний. **Вторая.** К ней относят изделия, принятие

которых может быть допущено с вероятностью β . Эта вероятность получила название ошибки второго рода, или риска потребителя. Ошибка второго рода имеет место тогда, когда плохая партия, изделия которой имеют уровень надежности хуже заданного, принимается по результатам испытаний.

Риски α и β назначаются достаточно малыми (от 0,001 до 0,2) по договоренности между изготовителем и заказчиком.

В ходе подготовки испытаний в качестве верхнего уровня надежности принимается уровень, заданный в технических условиях, в качестве нижнего уровня – такой уровень, с которым можно принимать изделия с заданными вероятностями α и β , а также значения нижней T_H и верхней T_B границы доверительного интервала.

Исходя из заданных исходных данных, осуществляется построение графика как функция $n(t_H)$ (рисунок 45). Линия 1 на графике носит название линии браковки, линия 2 – линии приемки.

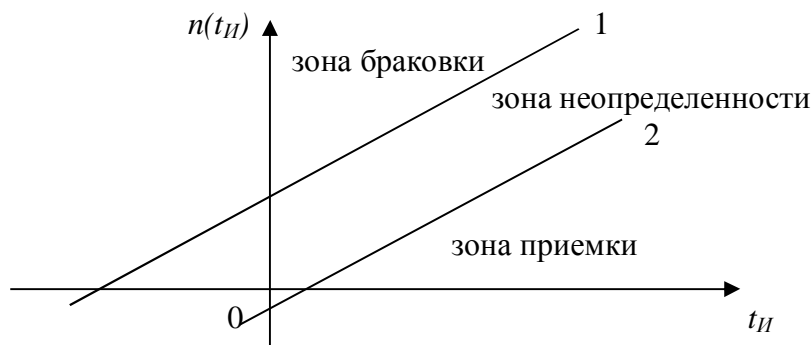


Рисунок 45

Для построения графика используют следующие уравнения:

– для линии приемки

$$n_{\text{пр}} \leq \frac{\ln[\beta/(1-\alpha)]}{\ln(T_B/T_H)} + \frac{1/T_H - 1/T_B}{\ln(T_B/T_H)} \cdot t_H;$$

– для линии браковки

$$n_{\text{бр}} \geq \frac{\ln[(1-\beta)/\alpha]}{\ln(T_B/T_H)} + \frac{1/T_H - 1/T_B}{\ln(T_B/T_H)} \cdot t_H.$$

В ходе испытаний на график наносят точки, соответствующие количеству отказов n за время t_H . Если точка располагается в зоне браковки, испытания прекращаются, выносится решение о несоответствии изделия заданным требованиям надежности. Если точка располагается в зоне приемки, испытания прекращаются, выносится решение о соответствии изделия требованиям надежности. При расположении точек в зоне неопределенно-

сти испытания продолжаются. Но при этом назначается предельная продолжительность испытаний.

10.4. УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Продолжительность испытаний на надежность для получения достоверных результатов должна быть не менее наработки изделий и, следовательно, для некоторых из них может достигать нескольких лет. Поэтому в настоящее время широко применяются методы ускоренных испытаний, позволяющие получать сведения о надежности изделий за время, существенно меньшее их наработки до отказа (наработки на отказ).

Наибольшее распространение получили методы ускоренных испытаний: метод линейного возрастания нагружения, метод экстраполяции, метод одноступенчатого нагружения, метод интенсификации приработки, метод эквивалентных испытаний и др.

Метод линейного возрастания нагружения используется при испытаниях объектов с постоянной скоростью деградиционных процессов в нормальных условиях эксплуатации. Ускорение испытаний достигается при линейном увеличении нагрузки во времени.

Метод экстраполяции основан на использовании зависимости параметров распределения наработки от нагрузки. Метод предполагает проведение испытаний при нескольких повышенных уровнях нагрузки и экстраполяцию их результатов для нормальных значений нагрузки.

В методе одноступенчатого нагружения используется принцип суммирования повреждений. Объект после периода приработки сначала подвергается обычной нагрузке, а затем повышенной.

Метод интенсификации приработки используется для ускорения исследований объектов с большим периодом приработки.

Метод эквивалентных испытаний строится по принципу ускоренного исчерпания ресурса объекта на основании анализа зависимостей между нагрузкой и характеристиками надежности по каждому виду нагружения. Ускорение получения информации о надежности достигается за счет проведения испытаний в наиболее тяжелых эксплуатационных режимах.

Форсированные ускоренные испытания можно рассматривать как разновидность физического моделирования, позволяющего оценить надежность при сжатом масштабе времени. Их возможность определена зависимостью надежности от величины внешних эксплуатационных факторов.

Лекция № 11

11.1. НАДЕЖНОСТЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Работоспособность микропроцессорных и компьютерных систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи возможна только при одновременной работоспособности аппаратуры («железа») и программных средств. Программное обеспечение превратилось в самостоятельное промышленное изделие, оказывающее огромное влияние на трудоемкость, стоимость, работоспособность микропроцессорных СЖАТ.

Под надежностью программного обеспечения понимается свойство программы выполнять заданные функции, сохраняя характеристики в установленных пределах при определенных условиях эксплуатации. Под отказом программного обеспечения понимается недопустимое отклонение характеристик функционирования от предъявляемых требований.

Надежность программного обеспечения включает следующие составляющие – корректность, устойчивость, безопасность, недоступность.

Корректность – свойство программы удовлетворять ее функциональному назначению. Корректность требует правильных вычислений в области изменения входных данных, при условии безотказности аппаратных средств. **Устойчивость** – свойство программы быть в процессе ее выполнения нечувствительной к ошибкам, отказам аппаратуры и некорректным входным данным. Это свойство аналогично свойству отказоустойчивости аппаратуры. Устойчивость программного обеспечения обычно обеспечивается с помощью введения различных форм избыточности, позволяющих иметь дублирующие модули программ, альтернативные программы для одних и тех же задач, осуществлять контроль над процессом исполнения программ. **Безопасность** – свойство программы вычислять правильные или защитные выходные данные при наличии ошибок исходных данных или при появлении отказов аппаратуры. Под защитными выходными данными понимают неправильные результаты вычислений, которые не переводят управляющую систему в опасное состояние. **Недоступность** – свойство программного обеспечения исключить возможность обращения одного пользователя к данным и программам, которые являются собственностью другого пользователя. Недоступность достигается тщательной изоляцией данных и программ разных пользователей друг от друга и от операционной системы, а также применением ключевых слов, кодов и т. д.

Ошибки программного обеспечения делят на: программные, алгоритмические, системные.

Программные ошибки вызываются неправильной записью команд на языке программирования и ошибками их трансляции. Их количество зависит от квалификации программистов, степени автоматизации программирования, глубины и качества тестирования. На начальных этапах разработки программные ошибки составляют одну треть всех ошибок.

Алгоритмические ошибки возникают из-за неправильной постановки задачи или из-за некорректной формулировки алгоритма ее решения. Системные ошибки связаны с неправильным взаимодействием комплексов программ между собой и внешними объектами.

Программные и аппаратные отказы имеют много общего, но во многом существенно различаются.

Общее между ними: невыполнение объектом заданных функций, время до отказа и время на устранение отказа носят случайный характер, статистические оценки показателей аппаратурной и программной надежности могут быть одинаковы по своему названию.

Отличие: отказ аппаратурный зависит либо от времени, либо от объема выполненной работы, а отказ программный – от вероятности выхода программы на ее участок, содержащий ошибку; устраненный аппаратурный отказ может повториться при дальнейшей эксплуатации объекта, устраненный программный отказ в дальнейшем не повторяется; прогнозировать возникновение многих аппаратурных отказов возможно, а прогнозировать возникновение отдельных программных отказов весьма затруднительно или просто невозможно; делить программные отказы на внезапные и постепенные по аналогии с аппаратурными отказами не имеет смысла.

Следствием появления ошибок в программе является ее сбой или отказ. Последствия отказов (сбоев) программного обеспечения можно разделить на: полное прекращение выполнения функций программы; кратковременное нарушение хода обработки информации.

11.2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Показателями надежности программного обеспечения являются:

– вероятность безотказной работы $P(t)$, представляющая собой вероятность того, что ошибки программы не проявятся в интервале времени решения конкретной задачи;

– вероятность отказа $Q(t)$;

– интенсивность отказов $\lambda(t)$;

– наработка на отказ T .

При определении характеристик надежности программного обеспечения учитывается тот факт, что возникающие при работе программ ошибки устраняются, количество ошибок уменьшается и, следовательно, их интенсивность понижается, а наработка на отказ программы увеличивается. В связи с такими предположениями рассматривается несколько моделей надежности программного обеспечения:

– модель с дискретно-понижающей частотой появления ошибок;

– модель с дискретным увеличением наработки на отказ или ошибку программного обеспечения;

– экспоненциальная модель надежности программного обеспечения.

11.3. МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

11.3.1. Модель с дискретно-понижающей частотой появления ошибок

Модель предполагает постоянство интенсивности отказов программы $\lambda(t)$ до обнаружения ошибки (отказа) программы и ее устранения. После этого значение $\lambda(t)$ уменьшается, интенсивность отказов снова становится константой. Тогда между интенсивностью отказов $\lambda(t)$ и числом оставшихся в программе ошибок существует зависимость:

$$\lambda(t) = k(M - i) = \lambda_i,$$

где M – неизвестное первоначальное число ошибок, i – число обнаруженных ошибок, k – некоторая константа.

Характер изменения интенсивности отказов для этой модели можно представить как на рисунке 46.

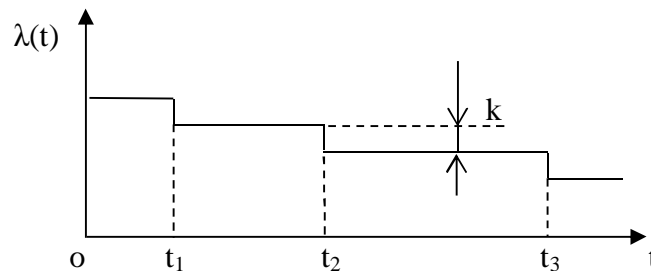


Рисунок 46

Плотность распределения времени обнаружения i -й ошибки в момент времени t_i определяется соотношением

$$f(t_i) = \lambda_i e^{-\lambda_i t_i}.$$

Значения неизвестных параметров k и M оцениваются на основании наблюдения интервалов времени между моментами обнаружения ошибок.

На практике условия рассмотренной модели нередко не соблюдаются из-за неуменьшения интенсивности отказов на одну и ту же величину k , возникновения других ошибок после устранения выявленных, невыявления причины возникновения ошибки.

11.3.2. Модель с дискретным увеличением времени наработки на отказ

Основным допущением модели является предположение о том, что отказы и ошибки программы в начале эксплуатации возникают часто. По

мере отладки программы ошибок становится меньше, а время наработки на отказ после ликвидации очередного отказа увеличивается.

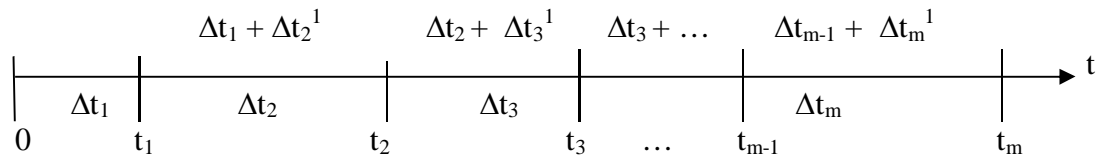


Рисунок 47

На рисунке 47 величины $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{m-1}, t_m$ – случайные моменты времени возникновения первого, второго, третьего и так далее – m -го отказов. Величины $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4, \dots, \Delta t_{m-1}, \Delta t_m$ – случайные интервалы времени между соседними отказами программы.

Пусть первая ошибка, проявившаяся в результате отказа программы, произошла в случайный момент времени t_1 и была устранена. Нарботка до первого отказа и возникшей ошибки равна интервалу времени Δt_1 . Вторая ошибка возникла в момент времени t_2 . Нарботка до второй ошибки определяется интервалом Δt_2 . В соответствии с предположением, этот интервал больше, чем Δt_1 , так как после перезапуска программа проработала время до возникновения первой устраненной ошибки, а затем продолжила работу до новой второй ошибки.

Случайное время возникновения ошибки t_i отсчитывается от начального момента времени $t = 0$. Время, необходимое на ликвидацию ошибки в расчет не берется. В этом случае для всех случайных моментов времени возникновения ошибки и временных интервалов между соседними ошибками можно записать:

$$\begin{aligned} t_1 &= \Delta t_1; \\ t_2 &= t_1 + \Delta t_2; \\ &\dots \dots \\ t_m &= t_{m-1} + \Delta t_m. \end{aligned}$$

Как видим, с последующим запуском программы после обнаружения и устранения ошибки временной интервал между соседними отказами постоянно увеличивается. Следовательно, увеличивается средняя наработка на отказ. Величину наработки на отказ программы можно оценить как:

$$t_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m}.$$

11.3.3. Экспоненциальная модель надежности

Основным предположением модели является экспоненциальный характер изменения числа ошибок в программе во времени. Основными па-

параметрами модели являются: τ – суммарное время функционирования от начала тестирования с устранением обнаруженных ошибок до момента оценки надежности; M – число ошибок, имеющих в программе перед началом тестирования; $m(\tau)$ – число исправленных ошибок; $m_0(\tau)$ – число оставшихся ошибок. При этом $M = m(\tau) + m_0(\tau)$.

Предполагается, что число ошибок в программе в каждый момент времени имеет пуассоновское (нормальное) распределение, а распределение интервала времени между ошибками подчиняется экспоненциальному закону.

Параметр экспоненциального распределения изменяется после выявления и устранения очередной ошибки. При этом интенсивность отказов считается непрерывной функцией, пропорциональной числу оставшихся ошибок.

С учетом введенных параметров и предположений количество оставшихся ошибок программы равно $m_0(\tau) = M - m(\tau)$.

Интенсивность появления ошибок равна $\lambda_0(\tau) = Cm_0(\tau)$, где C – коэффициент пропорциональности, учитывающий быстродействие ЭВМ и число команд в программе.

Интенсивность исправления ошибок равна:

$$\lambda(\tau) = \frac{dm(\tau)}{d\tau}.$$

Интенсивность исправления ошибок равна интенсивности их появления и обнаружения $\lambda(\tau) = \lambda_0(\tau)$.

Тогда

$$\frac{dm(\tau)}{d\tau} = Cm_0(\tau) = C[M - m(\tau)],$$

или

$$\frac{dm(\tau)}{d\tau} + Cm(\tau) = CM.$$

Решение дифференциального уравнения путем применения преобразования Лапласа выглядит как

$$m(\tau) = M(1 - e^{-C\tau}).$$

Ранее мы записали, что $m_0(\tau) = M - m(\tau)$. Подставив выражение для $m(\tau)$ в последнее уравнение, получим

$$m_0(\tau) = M - M + Me^{-C\tau} = Me^{-C\tau}.$$

Наработка на отказ программы после тестирования в течение времени τ :

$$T = \frac{1}{\lambda_0(\tau)} = \frac{1}{Cm_0(\tau)} = \frac{1}{CMe^{-C\tau}} = \frac{1}{CM} e^{C\tau}.$$

Из этого выражения следует, что наработка на отказ увеличивается по мере увеличения суммарного времени функционирования от момента начала тестирования с устранением обнаруженных ошибок.

11.4. ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ НАДЕЖНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Повышению надежности микропроцессорной техники содействуют следующие принципы:

- рациональный выбор алгоритмического языка, позволяющего сократить число операций и команд при выполнении поставленной задачи;
- введение в разрабатываемые программы тестовых задач, позволяющих обнаружить сбои и отказы в работе программ и даже произвести автоматическое переключение на резерв или на повторение операций;
- определение места возникновения неисправности (диагностические тесты) с целью ускорения работ по устранению неисправностей;
- обеспечение постоянной готовности резервных устройств к использованию их в качестве основных;
- обеспечение возможности перестроения структуры комплекса на новый режим работы в случае отказа некоторой его части (выполнение всего объема задач комплекса одной вычислительной машиной, хотя и с меньшим быстродействием, изменение приоритетности обработки данных), переход на другие средства отображения информации и т. д.

11.5. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММ

Существующие методы расчета надежности микропроцессорных систем ориентированы на учет только аппаратурных (технических) отказов. Расчеты надежности с учетом влияния программ находятся в стадии разработки.

Основная направленность и последовательность расчетов надежности технических устройств с учетом влияния программ сохраняется такой же, как и при расчете аппаратурной надежности.

Расчет надежности может производиться по двум возможным вариантам.

Вариант 1. Является грубо ориентировочным. В схему расчета надежности включается фиктивный блок – «программное изделие» с ха-

раактеристиками надежности, полученными либо из паспортных характеристик «программного изделия», либо из результатов его проверки и испытания. При этом предполагают экспоненциальность закона распределения программных ошибок. Тогда вероятность того, что ошибки в выполнении программ не появятся на интервале времени $0 - t$, равна:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt},$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность отказов всего изделия, вызванных ошибками программы.

Вариант 2. Это вариант расчета надежности изделия с учетом влияния программ на этапе совместного испытания аппаратуры и программ. Такой расчет проводится по обычным правилам, то есть с использованием либо структурных схем, либо графа состояний.

В качестве показателей надежности частей изделия используются программно-аппаратурные показатели надежности, когда изделие управляется реальной программой. При этом расчет надежности изделия приобретает характер расчета функциональной надежности, так как показатели надежности определяются для каждой из выполняемых функций.

Лекция 12

12.1. ПОНЯТИЕ О БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Для объектов, которые являются потенциальным источником опасности, важным понятием является «безопасность». Безопасность – свойство объекта при изготовлении, эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды. Безопасность движения поезда – это свойство движения поезда не переходить в опасное состояние.

Результаты анализа нарушений безопасности позволяют определить основные причины их возникновения:

- несоблюдение регламента технологических процессов;
- недостаточный профессионализм участников перевозочного процесса;
- частая сменяемость руководителей структурных подразделений, отделений и хозяйств железной дороги;
- низкий уровень системных требований к разработке, производству, испытанию приборов и в целом к системам, обеспечивающим безопасность движения.

12.2. ПОНЯТИЕ О ЗАЩИТНОМ И ОПАСНОМ ОТКАЗЕ

В соответствии с ОСТ 32.17-92 «Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Термины и определения» различают два вида неработоспособного состояния систем ЖАТ: защитное и опасное.

Защитное состояние – неработоспособное состояние системы, при котором значения всех параметров, характеризующих ее способность выполнять заданные функции по обеспечению безопасности движения поездов, соответствуют нормативно-технической документации.

Опасное состояние – неработоспособное состояние системы, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего ее способность выполнять заданные функции по обеспечению безопасности движения поездов, не соответствует нормативно-технической документации.

В соответствии с данными определениями различают отказы: защитные и опасные.

Защитный отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния системы при сохранении защитного состояния.

Опасный отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного и защитного состояния.

Опасный отказ может привести к возникновению аварии или крушению поезда. Защитный отказ нарушает безотказность системы, но не нарушает безопасность. Опасный отказ нарушает и безотказность, и безопасность.

Чтобы решить вопрос о том, какой отказ в системе является опасным, формулируют критерий опасного отказа – признак или совокупность при-

знаков опасного состояния системы.

В соответствии с РД 32ЦШ 1115842.03.93 «Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Критерии опасных отказов» признаками опасного отказа являются: нарушение концепции безопасности, по которой построено изделие; отклонение хотя бы одного показателя безопасности за пределы установленных норм; отказ составной части системы ЖАТ, переводящий ее в опасное состояние; выход показателей качества функционирования системы за пределы установленных норм в результате перехода в предельное состояние.

Методы повышения безопасности функционирования технических средств основываются на трех принципах:

- уменьшение интенсивности опасных отказов технических средств или опасных ошибок специалистов;
- уменьшение числа видов опасных отказов или опасных ошибок;
- увеличение коэффициента парирования опасных отказов или опасных ошибок.

Первое достигается путем создания необходимых запасов прочности (надежности) элементов при изготовлении и последующего восполнения запасов в процессе эксплуатации в результате профилактики или ремонтов. Второе достигается путем выбора оптимальной структуры технического средства. Третье достигается путем применения эффективных методов парирования опасных отказов.

12.3. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ

Оценку безопасности дают вероятностные показатели, которые определены в ОСТ 32.17-92. К вероятностным количественным показателям безопасности относятся:

- вероятность безопасной работы $P_B(t)$;
- вероятность опасного отказа $Q_{OP}(t)$;
- интенсивность опасных отказов $\lambda_{OP}(t)$;
- параметр потока опасных отказов $\omega_{OP}(t)$;
- средняя наработка до опасного отказа T_{OP} ;
- средняя наработка на опасный отказ $T_{B\text{ ср}}$;
- коэффициент безопасности K_B .

Вероятность безопасной работы $P_B(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки t опасный отказ системы не возникает.

При этом предполагается, что в начальный момент интервала времени система находится в исправном или работоспособном состоянии, но не находится в защитном состоянии. Вероятность безопасной работы $P_B(t)$ определяется по формуле

$$P_B(t) = 1 - F_{OP}(t),$$

где $F_{\text{ОП}}(t)$ – функция распределения наработки до опасного отказа.

Вероятность опасного отказа $Q_{\text{ОП}}(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки опасный отказ наступает хотя бы один раз.

Вероятность опасного отказа $Q_{\text{ОП}}(t)$:

$$Q_{\text{ОП}}(t) = 1 - P_{\text{Б}}(t).$$

Величины вероятности безопасной работы и вероятности опасного отказа оценивают безопасность системы до возникновения первого опасного отказа. При этом защитных отказов не было.

Интенсивность опасных отказов $\lambda_{\text{ОП}}(t)$ – условная плотность вероятности возникновения опасного отказа невозстанавливаемой системы, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

Статистически величину интенсивности опасных отказов $\lambda_{\text{ОП}}(t)$ определяют в результате испытаний по формуле

$$\lambda_{\text{ОП}}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{СР}}\Delta t},$$

где $n(\Delta t)$ – число образцов системы, имевших опасный отказ за интервал времени Δt , $N_{\text{СР}}$ – среднее число работоспособных элементов, не имевших опасных отказов в интервале времени Δt (при условии, что образцы системы, которые имели защитный отказ, немедленно заменялись новыми).

В данном случае среднее число работоспособных образцов системы определяется как

$$N_{\text{СР}} = \frac{N_{i+1} + N_i}{2},$$

где N_i – число работоспособных образцов системы в момент времени $(t - \Delta t)/2$; N_{i+1} – число работоспособных образцов системы, не имевших опасных отказов к моменту времени $(t + \Delta t)/2$.

Параметр потока опасных отказов $\omega_{\text{ОП}}(t)$ – отношение математического ожидания числа опасных отказов восстанавливаемой системы за произвольно малую ее наработку к значению этой наработки.

Статистически этот показатель определяют по результатам испытаний или эксплуатации по формуле

$$\omega_{\text{ОП}}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0\Delta t},$$

где $n(\Delta t)$ – число образцов системы, имевших опасный отказ за интервал времени Δt при условии, что образцы системы, которые имели опасный или защитный отказ, немедленно заменялись новыми; N_0 – число образцов системы, поставленных на испытание в момент времени $(t - \Delta t)/2$.

Средняя наработка до опасного отказа $T_{оп}$ – математическое ожидание наработки невосстанавливаемой системы до первого опасного отказа.

Средняя наработка на опасный отказ $T_{Б ср}$ – отношение суммарной наработки восстанавливаемой системы к математическому ожиданию числа опасных отказов в течение этой наработки.

Коэффициент безопасности K_B – вероятность того, что система окажется в работоспособном или в защитном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение системы по назначению не предусматривается.

Этот коэффициент является комплексным показателем безопасности системы, который учитывает ее безопасность и ремонтпригодность.

Его величину можно определить по формуле:

$$K_B = \frac{T_{Б ср}}{T_{Б ср} + T_{В ср}},$$

где $T_{В ср}$ – среднее время восстановления.

Фактические значения показателей безопасности не должны быть ниже нормативных, так как только в этом случае перевозки можно считать безопасными.

12.4. ОШИБКИ ЧЕЛОВЕКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ

При интервальном регулировании движения поездов с использованием комплексов СЖАТ люди выполняют функции оператора-ремонтника, оператора-контролера и оператора-руководителя. Обслуживающий персонал дистанции сигнализации и связи – это операторы-ремонтники с инструментом и приборами для ремонта. Результатом функционирования операторов-ремонтников являются работоспособные устройства. Машинисты, выполняя функции оператора-контролера, обеспечивают новое положение поезда в пространстве за заданное время. Операторы-руководители обеспечивают выполнение графика движения поездов. В результате своей деятельности операторы могут совершать ошибки.

Основными причинами опасных воздействий оперативного и обслуживающего персонала на СЖАТ, кроме преднамеренных действий, являются:

- несогласованность действий, профессиональная непригодность человека-оператора;
- ошибки операторов от недостатка информации, неравномерности их загрузки или снижения внимания от монотонности труда;
- нарушение технологии производства работ или периодичности технического обслуживания, низкая квалификация обслуживающего персонала или расхождение опыта его работы с реальной ситуацией.

Для снижения интенсивности опасных воздействий человека на про-

цесс движения поездов, управляемый с использованием СЖАТ, рекомендуется следующее:

- расширение функций автоматических устройств, подстраховывающих действия машиниста по управлению тормозами для выполнения требований безопасности движения;

- повышение уровня профессиональной подготовленности, запасов физиологической и психической устойчивости оператора (повышение его начальной надежности);

- совершенствование устройств обнаружения опасных отказов оператора и увеличение вероятности перевода технологического процесса в защитное состояние при обнаружении опасных действий оператора.

Можно достичь существенного повышения уровня безопасности перевозок, прежде всего в результате реализации мероприятий, направленных на предотвращение нарушений технологических процессов обслуживания и ремонта технических средств и подвижного состава хозяйств пути. К таким мероприятиям следует отнести:

- автоматизированный пооперационный контроль своевременности и качества выполнения технологических процессов;

- автоматизированный контроль остаточного ресурса технических средств;

- автоматизированный расчет фактических и прогнозируемых показателей безопасности перевозок;

- автоматизированная выработка оперативных рекомендаций по предотвращению нарушений условий безопасности перевозок.

Эти мероприятия реализуются путем внедрения автоматизированной системы управления безопасностью движения (АСУ БД).

12.5. КОНТРОЛЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Эффективно управлять безопасностью невозможно без достоверных данных о причинах и последствиях возникновения защитных и опасных отказов, об уровне надежности технических систем, о квалификации персонала.

Система сбора и обработки информации о надежности должна обеспечить определение и оценку показателей надежности, выявление конструктивных и технологических недостатков, установление деталей и сборочных единиц, ограничивающих надежность конечных изделий, определение закономерностей возникновения отказа, оптимизацию норм расхода запасных частей, выявление недостатков эксплуатации и совершенствование системы технического обслуживания и ремонта, установление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность, корректировку нормируемых показателей надежности, определение эффективности мероприятий по поддержанию эксплуатационной надежности на необходимом уровне.

Лекция 13

13.1. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УЧЕТА КАСАНТ

Эффективность деятельности сети железных дорог может быть обеспечена за счет бесперебойной работы технических средств и в первую очередь объектов инфраструктуры и подвижного состава. Одним из показателей, характеризующих качество работы технических средств, является количество случаев нарушения их нормальной деятельности.

Важное место приобретает системный анализ качества работы на базе получения объективной информации из различных источников, в том числе средств диагностики. Для сбора информации об отказах технических средств на основе данных графиков исполненного движения, используемых в перевозочном процессе, разработана Комплексная Автоматизированная Система учета, контроля, устранения отказов и Анализа Надежности Технических средств КАСАНТ.

Сочетания различных способов контроля и идентификации позволяет обеспечить необходимую достоверность и полноту исходной информации о подвижном составе. Это качественно повышает эффективность информационно-управляющих систем за счет уменьшения негативного влияния «человеческого фактора» и позволяет перейти к прогнозным методам.

КАСАНТ явилась принципиально новым инструментом мониторинга состояния объектов инфраструктуры и подвижного состава. Система установила единство порядка учёта и расследования случаев отказов технических средств во всех хозяйствах, на всех железных дорогах ОАО «РЖД», существенно повысила достоверность и оперативность сбора информации за счёт «безбумажной» технологии процесса. Система КАСАНТ позволила поэтапно перейти на единую систему учёта и анализа отказов в работе технических средств, внедрить комплексные методы оценки эффективности эксплуатационной деятельности как по отраслевым хозяйствам, так и в целом по компании, с использованием единой общесетевой базы данных учёта отказов технических средств.

Система КАСАНТ интегрирована с автоматизированными системами:

- системой автоматизированного ведения графика движения поездов (ГИД «Урал-ВНИИЖТ»);
- автоматизированной системой ведения актов комиссионных месячных осмотров станций (АС КМО);
- автоматизированной системой контроля технического состояния подвижного состава (АСК ПС);
- автоматизированной системой выдачи и отмены предупреждений (АСУВОП-2);
- автоматизированной системой управления путевым хозяйством (АСУ-П);

– комплексной автоматизированной системой управления инфраструктурой хозяйством сигнализации, централизации и блокировки (АСУ-Ш-2);

– автоматизированной системой управления хозяйством электрификации и электроснабжения (АСУ-Э).

Особенностью системы КАСАНТ от локальных информационных разработок, действовавших ранее на ряде железных дорог, стала автоматическая фиксация факта отказа на основе информации, вносимой поездным диспетчером в автоматизированный график исполненного движения поездов системы ГИД «Урал-ВНИИЖТ». Для повышения достоверности данных в систему КАСАНТ заложена возможность формирования информации об отказах технических средств из нескольких источников. Корректность учёта факта отказа реализована через механизм проверки поступающих данных на предмет дублирования с возможностью последующего объединения данных пользователей.

Сбор информации об отказах прежде базировался на системе передачи бумажных отчетов, что не исключало возможности сокрытия и искажения информации об отказах на любом этапе ее передачи. Отсутствие единого порядка, описывающего взаимодействие причастных хозяйств в вопросах учета и расследования отказов, не позволяло объективно оценивать состояние инфраструктуры и подвижного состава. В рамках РЖД действовал ряд изолированных друг от друга нормативных документов, определяющих порядок учета отказов технических средств по каждому хозяйству. В связи с этим при возникновении отказов, определении причин и ответственности зачастую возникали межфункциональные противоречия. Применение единой информационной технологии позволило обеспечить оперативное получение информации, передачу ее причастным специалистам для организации процесса устранения неисправности, контролировать своевременность и качество формирования материалов расследования по каждому случаю отказа.

В системе КАСАНТ реализованы следующие функции:

– автоматизированное формирование первичной информации по отказам технических средств на основе пометки поездного диспетчера в системе ГИД-Урал;

– формирование первичной информации об отказе технического средства на основе ручного ввода диспетчером причастного хозяйства (при отсутствии ведения ГИД-Урал в автоматизированном режиме);

– автоматический контроль первичной информации на предмет возможного дублирования с запросом пользователя на объединение данных;

– автоматическая передача информации об отказе диспетчерам причастных хозяйств (в том числе и относящимся к различным железным дорогам) для организации процесса установления причины и устранения отказа;

- автоматический контроль принятия отказов к учету причастными службами (дирекциями) и структурными подразделениями с выдачей информационного оповещения о нарушениях ответственным руководителям на уровне отделения и управления дороги;

- автоматический контроль полноты и корректности материалов расследования отказов, вносимых в систему причастными структурными подразделениями;

- формирование отчетных и аналитических справок по отказам технических средств за выбранный пользователем период.

Важным направлением повышения достоверности поступающей информации является интеграция КАСАНТ с отраслевыми автоматизированными системами управления (АСУ-П, АСУ-Т, АСУ-Ш2 и др.) по обмену данными об отказах. В ряде перечисленных автоматизированных систем в локальной форме реализованы задачи по расшифровке и анализу скоростемерных лент, кассет регистрации КЛУБ-У, считыванию сведений о нарушении нормальной работы с напольных устройств СЦБ, данных вагонов-путеизмерителей и других мобильных средств измерения. Для организации эффективного взаимодействия с системой КАСАНТ предполагается доработка указанных автоматизированных систем в части хранения и доступа к данным вагонов-путеизмерителей, результатам расшифровки скоростемерных лент, кассет регистрации КЛУБ-У и других устройств регистрации параметров движения поезда.

Система КАСАНТ развивается по следующим направлениям:

- разработка подсистемы определения экономического ущерба от отказов технических средств и подсистемы определения показателей надежности по основным видам оборудования. Реализация в рамках КАСАНТ задачи по оценке экономических потерь от отказов позволит определять направления инвестиций в развитие материально-технической базы Компании. При этом изменяется и система оценки качества работы соответствующих хозяйств и видов оборудования от количественных показателей (больше или меньше отказов) к качественным (величина экономического ущерба вследствие отказов). Такая оценка является более объективной и приемлемой с экономической точки зрения и позволяет строить отношения между хозяйствами внутри Компании на основе экономического взаимодействия;

- оценка влияния отказов технических средств на важнейшие эксплуатационные показатели: участковую скорость, оборот вагона, производительность локомотива;

- оценка работы оперативного персонала, в первую очередь диспетчерского аппарата хозяйства перевозок;

- автоматический анализ ситуаций, которые привели к серьезным задержкам поездов. Это позволит не допустить необоснованное перекладывание ответственности за неэффективную организацию перевозочного процесса на случаи отказов технических средств.

13.2. СИСТЕМА УРРАН

Задачи оптимизации расходов на содержание инфраструктуры РЖД потребовали новых подходов к управлению надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла с использованием методологии обеспечения безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности в соответствии с международными стандартами. Это дает возможность снизить стоимость жизненного цикла объектов инфраструктуры и подвижного состава при обеспечении высокой надёжности и требуемого уровня безопасности перевозочного процесса

В национальных стандартах по управлению надёжностью не отражены вопросы управления инвестициями, затратами на текущее содержание. Обслуживание технических средств ведётся на основе нормативного срока их службы, зачастую без учёта текущего состояния.

В связи с этим разработан и внедряется проект УРРАН (Управление Ресурсами, Рисками, Анализом Надежности на этапах жизненного цикла объектов железнодорожного транспорта). УРРАН – это прежде всего система поддержки принятия управленческих решений по обеспечению требований надёжности и безопасности функционирования технических средств на железнодорожном транспорте.

УРРАН обеспечивает переход от традиционных показателей надёжности и безопасности к показателям, отражающим эксплуатационную деятельность РЖД. УРРАН ориентирован на управление надёжностью перевозочного процесса. Впервые на примере путевого хозяйства для оценки способности инфраструктуры к выполнению заданного объёма перевозок с установленной скоростью введены показатели, характеризующие надёжность не конкретного технического объекта или системы, а перевозочного процесса в целом. Она выражена эксплуатационным коэффициентом готовности, в котором учитываются не только параметры безотказности и ремонтпригодности, но и параметры перевозочного процесса: участковой скорости поездов, плановых и внеплановых технологических перерывов.

На основе принципов и системы показателей эксплуатационной надёжности и безопасности стало возможным разработать методики оптимизации управления инвестициями в хозяйствах компании на всех этапах жизненного цикла. Эти методики управления инвестициями напрямую связаны с текущими оценками рисков перевозочного процесса.

Почему возникла необходимость внедрения технологии УРРАН?

Международная методология обеспечения безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности на железнодорожном транспорте базируется на принципе обеспечении безопасности и надёжности на всех этапах жизненного цикла объекта железнодорожного транспорта. Суть ее заключается в обеспечении настолько низкого уровня остаточного риска, насколько это в разумной мере возможно, в том числе из экономических

соображений. Однако она не в полной мере решает задачи управления надежностью, безопасностью, ресурсами и не охватывает аспекты долговечности, предусмотренные российскими стандартами. Кроме того, методология практически не рассматривает человеческий фактор и не затрагивает проблемы управления затратами на содержание и модернизацию объектов инфраструктуры на этапах жизненного цикла.

При функционировании железнодорожного транспорта задействуется большое количество людей – от пассажиров, обслуживающего персонала, персонала, ответственного за работу оборудования до других участников движения. Каждый из них реагирует на возникшую ситуацию по-разному. Поскольку человек может оказать большое влияние на эксплуатационную надежность, потребовался более строгий учет человеческого фактора.

Человеческий фактор может быть определен как влияние характерных особенностей, возможностей и поведения человека на систему. Данный фактор включает анатомические, физиологические и психологические особенности людей. Понятия, связанные с человеческим фактором, используются, чтобы позволить людям работать рационально и эффективно, с должным вниманием к потребностям человека в аспектах здоровья, безопасности и получения удовлетворения от работы. Поэтому возникла необходимость объединить подходы международной методологии управления надежностью и системы управления ресурсами, рисками и надежностью объектов железнодорожного транспорта на этапах жизненного цикла – систему УРРАН.

В функции системы УРРАН входят:

- автоматизация первичной обработки статистических данных об отказах технических объектов инфраструктуры и подвижного состава железнодорожного транспорта;
- определение количественных значений показателей эксплуатационной надежности и безопасности объектов инфраструктуры;
- количественная оценка производственной деятельности хозяйств инфраструктуры и подвижного состава с учетом отказов и организации технического обслуживания и эксплуатации объектов инфраструктуры.

Что скрывается под понятием «риск»?

Под риском понимают ожидаемую частоту или вероятность возникновения опасностей определенного класса, или же размер возможного ущерба (потерь, вреда) от нежелательного события, или же некоторую комбинацию этих величин. Риск, фактически, есть мера опасности. Применение понятия риск, таким образом, позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий. Формирование опасных и чрезвычайных ситуаций – результат определенной совокупности факторов риска, порождаемых соответствующими источниками.

Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать индивидуальный, технический, экологический, социальный,

экономический риск. Индивидуальный риск обусловлен вероятностью реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций. Технический риск выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. Экологический риск выражает вероятность экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия. Социальный риск характеризует масштабы и тяжесть негативных последствий чрезвычайных ситуаций, а также различного рода явлений и преобразований, снижающих качество жизни людей. По существу, это риск для группы или сообщества людей. Экономический риск определяет соотношение пользы и вреда, получаемого обществом от рассматриваемого вида деятельности.

Использование различных видов риска позволяет выполнять поиск оптимальных решений по обеспечению надежности и безопасности как на уровне предприятия, так и в масштабах инфраструктур. Для этого необходимо выбирать значения приемлемого риска. Приемлемый риск сочетает в себе технические, экологические, социальные аспекты и представляет некоторый компромисс между приемлемым уровнем безопасности и экономическими возможностями его достижения, т. е. можно говорить о снижении индивидуального, технического или экологического риска, но нельзя забывать о том, сколько за это придется заплатить и каким в результате окажется социальный риск.

Первопричинами риска являются:

- отказы в работе узлов и оборудования вследствие их конструктивных недостатков, плохого технического изготовления или нарушения правил технического обслуживания;
- отклонения от нормальных условий эксплуатации;
- ошибки персонала;
- внешние воздействия и пр.

Риск является неизбежным, сопутствующим фактором промышленной деятельности. Риск объективен, для него характерны неожиданность, внезапность наступления, что предполагает прогноз риска, его анализ, оценку и управление – ряд действий по недопущению факторов риска или ослаблению воздействия опасности.

Анализ риска – процесс идентификации опасностей и оценки риска для отдельных лиц, групп населения, объектов, окружающей природной среды и других объектов рассмотрения.

Анализ риска должен дать ответы на три основных вопроса:

1. Что плохого может произойти? (Идентификация опасностей).
2. Как часто это может случаться? (Анализ частоты).
3. Какие могут быть последствия? (Анализ последствий).

Оценка риска – процесс, используемый для определения величины (меры) риска анализируемой опасности для здоровья человека, материальных ценностей, окружающей природной среды и других ситуаций, связанных с реализацией опасности. Оценка риска – обязательная часть анализа. Оценка риска включает анализ частоты, анализ последствий и их сочетаний.

Управление риском – это часть системного подхода к принятию решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности промышленных аварий для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба материальным ценностям и окружающей природной среде. Речь идет о предотвращении возникновения аварийных ситуаций на производстве и мерах по локализации негативных последствий в тех случаях, когда аварии произошли.

Для управления риском его необходимо проанализировать и оценить. В качестве количественного показателя риска выступают численные значения вероятности наступления нежелательного события или (и) результатов нежелательных последствий (ущерба).

Система УРРАН обеспечивает управление рисками на железнодорожном транспорте. Она имеет своей целью достижение такого состояния железнодорожного транспорта, при котором риски причинения вреда людям и окружающей среде, экономических потерь, нанесения ущерба инфраструктуре и подвижному составу снижены до приемлемого уровня. Именно снижены, а не исключены, поскольку полное исключение риска невозможно.

Процесс управления рисками предусматривает идентификацию опасностей, определение частоты и последствий опасных событий, оценивание риска, его обработку и мониторинг.

Для определения частоты возникновения события на железнодорожном транспорте используются:

- оценка частоты возникновения определенного события в прошлом на основе статистических данных (данные, накопленные за некоторый период эксплуатации рассматриваемого объекта инфраструктуры или подвижного состава, содержащиеся в АСУ хозяйств отрасли или АС РБ) и прогнозирование частоты, с которой это событие станет возникать в будущем;

- оценка частоты возникновения определенного события на основе данных об отказах технических средств (данные, содержащиеся в системе КАСАНТ), произошедших за определенный период времени и приходящихся на единицу измерения эксплуатационной работы по каждому хозяйству железнодорожного транспорта;

- прогнозирование частот событий с использованием анализа диаграммы возможных отказов объекта инфраструктуры или подвижного состава (анализ «дерева отказов» и анализ диаграммы возможных последствий определенного отказа («дерева событий»));

– оценка на основе показателей эксплуатационной надежности и безопасности функционирования для железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава пассажирских и грузовых перевозок со скоростями движения до 160 км/ч и для высокоскоростного движения;

– оценка на основе мнения экспертов. При проведении экспертных оценок следует учитывать любую доступную информацию об объекте инфраструктуры или подвижного состава: статистическую, экспериментальную, конструктивную и др.

Анализ последствий предусматривает оценку результатов воздействия нежелательного события на людей, имущество и окружающую среду. На основе статистических данных об опасных событиях по объектам инфраструктуры и подвижного состава, получаемых из автоматизированных систем КАСАНТ, в УРРАН рассчитываются оценки соответствующих рисков. Риск оценивается как комбинация двух составляющих – частоты возникновения и последствий, а затем сравнивается с приемлемым для своего вида уровнем.

Результаты оценки представляются в форме матриц риска. Далее принимается решение об обработке риска в зависимости от его значимости, определение порядка финансирования.

На практике широко применяются следующие варианты мер по обработке риска: предотвращение, перенос, снижение и принятие риска.

С точки зрения минимизации риска представляют интерес первые три варианта. Основным и наиболее применимым для объектов инфраструктуры методом обработки риска является снижение риска. При этом внедрение средств контроля опасных отказов и других нежелательных событий позволяет снизить частоту их возникновения или размер возможных последствий, таким образом, минимизируя контролируемый риск.

Например, последствия отказа тормозной системы поезда могут привести к многочисленным жертвам, причинению существенного вреда экологии и имуществу. Уменьшить размер последствий такого опасного отказа практически невозможно. Но применение эффективных средств технического контроля позволит значительно снизить частоту возникновения опасности, вследствие чего риск будет минимизирован.

Риски, связанные с объектами инфраструктуры, определяются составляющими, вносимыми на различных стадиях жизненного цикла объектов. Например, риск нарушения безопасности движения поездов из-за отказов технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) зависит от трех основных составляющих интенсивности отказов оборудования: допустимой, проектной и фактической. Допустимая интенсивность отказов устанавливается требованиями перевозочного процесса при обеспечении безопасности движения поездов, проектная характеризует систему в процессе создания на таких этапах жизненного цикла, как разработка, проектирование и производство, а фактическая соответствует показателям отказов на этапе эксплуатации объекта ЖАТ.

Процесс управления рисками находится в непосредственной связи с управлением расходами на содержание инфраструктуры. Продление срока службы сложных технических систем определяется по результатам инструментальной диагностики фактического состояния объекта. Окончательное решение о продлении срока службы принимается на основе анализа зависимости показателя надежности технических систем от времени эксплуатации или выполненной работы, выраженной в физических величинах.

Информация об отказах и рисках объектов инфраструктуры поступает в три системы поддержки принятия решений, которые являются ядром информационной технологии УРРАН.

Система поддержки принятия решений по управлению надежностью и функциональной безопасностью включает в себя:

- модуль первичного расчета и оценки надежности объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Он является составной частью АС УРРАН и осуществляет расчет показателей безотказности, ремонтнопригодности, готовности, долговечности, безопасности, а также стоимости жизненного цикла эталонных объектов всех хозяйств пути, автоматики и телемеханики, электрификации и электроснабжения, связи и информатизации. Все эталонные объекты – это простые устройства, для которых определены необходимые коэффициенты пересчета;

- модуль расчета и прогнозирования показателей надежности и функциональной безопасности сложных систем. Этот модуль предназначен для расчетов резервированных систем автоматики и телемеханики, электрификации и электроснабжения и информационно-управляющих систем АС УРРАН. Он основывается на разработанном топологическом полумарковском методе и позволяет рассчитывать как стационарные, так и нестационарные показатели надежности и функциональной безопасности системы;

- модуль поддержки принятия решений по управлению надежностью и функциональной безопасностью на железнодорожном транспорте с учетом интенсивности и скорости движения поездов, длительности задержек поездов по причине отказов технических средств, рисков железнодорожной администрации и, конечно, интенсивности отказов и длительности их восстановления. Модуль реализуется в АС УРРАН. Следует отметить, что рекомендации по принятию соответствующего решения учитывают результаты оценки рисков по каждому из хозяйств инфраструктуры.

Система поддержки принятия решений по управлению ресурсами содержит:

- модуль оптимизации технического обслуживания и ремонтов объектов по их состоянию;

- модуль поддержки принятия решений по управлению стоимостью

жизненного цикла. Назначение работ АС УРРАН согласно данному модулю основывается на сравнении фактических и контрольных значений многих показателей. В частности, по ремонтам пути используются следующие показатели:

- пропущенный тоннаж, млн т;
- частота отказов на 1 км пути;
- прямые расходы на текущее содержание 1 км пути.

Система поддержки принятия решений по транспортным происшествиям и событиям состоит из системы прогнозирования транспортных происшествий и системы поддержки принятия решений при возникновении чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте (пожаров, стихийных бедствий, крупных транспортных происшествий, вандализма, терроризма).

В хозяйствах автоматики и телемеханики оценка работы дистанций СЦБ производится по интегральному показателю качества, определяемому из двух составляющих – балльной оценки содержания и балльной оценки оперативного устранения отказов технических средств, а также нанесенному ущербу жизни и здоровью людей, материальному ущербу в результате имевших место нарушений в работе технических средств ЖАТ, в том числе и за допущенные задержки пассажирских и грузовых поездов.

В случае, если по дистанции СЦБ отказ или нарушение в работе устройств ЖАТ привело к транспортному происшествию (крушение поезда, авария кроме задержки поезда на 1 час и более), то оценка показателя качества технической эксплуатации средств ЖАТ за месяц по дистанции СЦБ определяется как «неудовлетворительная» и на матрице рисков попадает в красную зону.

В соответствии с методологией УРРАН рассчитываются и оцениваются основные показатели надежности: K_G – коэффициент готовности, K_D – коэффициент простоя, λ – интенсивность потока отказов, T_B – среднее время восстановления, μ – интенсивность восстановления, T – наработка на отказ.

При этом для указанных показателей надежности различают три уровня:

- проектные, определяемые по данным технических условий на технические средства и по проектным схемам;
- допустимые, определяемые по условиям перевозочного процесса (максимального допустимого суммарного времени задержки поездов по всей дороге в сутки или за иной отчетный период);
- фактические, которые оцениваются по статистическим данным из АСУ-Ш-2, КАСАНТ, нормативным документам по учету отказов технических средств.

Сравнение допустимого и фактического уровней дает возможность определить, соответствует ли последний из них требованиям

перевозочного процесса. Сравнение уровней дает возможность определить интегральный показатель качества в виде балльной оценки качества содержания и балльной оценки оперативности устранения отказов технических средств.

В соответствии с методологией УРРАН в дополнение к балльной оценке содержания технических средств и оперативности устранения последствий отказов применяется методика учета тяжести и величины ущерба последствий отказов. Оценка нанесенного ущерба в результате отказа предусматривает пять уровней тяжести последствий: незначительный, серьезный, критический, катастрофический, бедственный – и четыре уровня рисков: зеленый, желтый, оранжевый, красный.

Все это оформляется в виде матрицы рисков (таблица 4).

Таблица 4

Уровни		Уровни тяжести последствий (величина ущерба)				
		< 50 тыс. руб	50–200 тыс. руб	200–4000 тыс. руб	4000–20000 тыс. руб	>20000 тыс. руб
		незначительный	серьезный	критический	катастрофический	бедственный
$\lambda \geq 10^{-1}$	частое	оранжевый	оранжевый	красный	красный	красный
$10^{-2} \leq \lambda < 10^{-1}$	вероятное	желтый	оранжевый	оранжевый	красный	красный
$10^{-3} \leq \lambda < 10^{-2}$	случайное	желтый	желтый	оранжевый	оранжевый	красный
$10^{-4} \leq \lambda < 10^{-3}$	редкое	зеленый	желтый	желтый	оранжевый	оранжевый
$10^{-5} \leq \lambda < 10^{-4}$	крайне редкое	зеленый	зеленый	желтый	желтый	оранжевый
$\lambda < 10^{-5}$	маловероятное	зеленый	зеленый	зеленый	желтый	желтый

После определения уровня нанесенного ущерба в результате отказа с учетом расчета величины интенсивности потока отказа на матрице рисков определяется точка, положение которой (ее цвет) характеризует состояние хозяйства (дистанции) в зависимости от принятой в ОАО РЖД градации.

Лекция 14

14.1. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ ОБЪЕКТОВ

Надежность технических объектов зависит от многих факторов. Изучение влияния факторов на надежность объектов – самостоятельное направление исследовательских работ по надежности, называемое анализом физики отказов. Влияние факторов на надежность объектов исследуется в ходе специальных испытаний на надежность.

Во время эксплуатации на объекты действуют как благоприятные, так неблагоприятные факторы. Благоприятные факторы оказывают малое влияние на снижение надежности. Неблагоприятные факторы могут привести к отказам.

Большинство объектов представляют собой единство трех частей: технических средств, программного обеспечения, обслуживающего персонала. Поэтому и факторы, влияющие на надежность, делят на три основные группы: технические, программные, эксплуатационные (климатические, зависящие от качества обслуживания, зависящие от взаимоотношений системы человек-машина).

Технические факторы – факторы, которые зависят от структуры объекта и его рабочих режимов, применения резервирования, организации контроля и восстановления после отказа, характеристик комплектующих элементов, защищенности элементов от неблагоприятных факторов, качества технологических процессов в процессе изготовления, степени приспособленности для эксплуатации.

Программные факторы зависят от качества разработки программного обеспечения микропроцессорной техники.

Эксплуатационные факторы зависят от внешней среды, окружающей объект в процессе эксплуатации.

Климатические факторы – температура, влажность, солнечная радиация, ветровые нагрузки и др.

Биологические факторы. Нас окружает живая природа. Грызуны, насекомые, плесень, экскременты животных и птиц наносят серьезный ущерб, если не применять необходимых мер защиты.

Влияние обслуживания на надежность определяется тем, что часто объекты являются автоматизированными, а не автоматическими системами. Человек является своеобразным звеном, вписывающимся в структуру системы.

Взаимоотношения человека и техники. С развитием техники, усложнением ее структуры, расширением выполняемых функций вопрос о взаимоотношении человека и техники приобретает все большую остроту.

Обзор факторов, влияющих на надежность, позволяет сделать вывод о том, что поиск путей повышения надежности должен строиться на комплекс-

ном системном подходе. Обеспечение надежности должно представлять единую систему взаимосвязанных и взаимообусловленных мероприятий.

14.2. УЧЕТ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ

Сущность метода учета условий эксплуатации при расчете надежности систем заключается в том, что в расчетные формулы определения показателей надежности подставляются значения интенсивностей отказов, определенные для заданных режимов и условий эксплуатации.

Определение величин интенсивности отказов для заданных условий эксплуатации производится путем:

- применения расчетных графиков функции $\lambda = f(\theta)$, где θ – режим работы и условия эксплуатации;
- использованием поправочных коэффициентов a_i для интенсивности отказов λ_0 , определенных в лабораторных условиях;
- использованием таблиц интенсивностей отказов элементов для данных условий эксплуатации.

Коэффициент a_i представляет собой отношение величины интенсивности отказа λ , соответствующего заданным условиям эксплуатации, к интенсивности отказов того же элемента λ_0 , определенного в лабораторных условиях (при нормальной температуре и давлении, при нормальной нагрузке):

$$a = \frac{\lambda}{\lambda_0}.$$

В расчетах надежности могут учитываться несколько видов поправочных коэффициентов, таких как

- a_1 – учитывающий электрическую нагрузку и температуру элементов;
- a_2 – учитывающий влияние механических нагрузок;
- a_3 – учитывающий изменение интенсивности отказов в условиях хранения, транспортирования и т. д.

Значение интенсивности отказа элемента для конкретных условий эксплуатации можно определить по формуле $\lambda = a_1 \lambda_0$.

Если необходимо одновременно учесть несколько факторов, то при условии их независимости интенсивность отказов будет равна:

$$\lambda = a_1 \cdot \lambda_0 + a_2 \cdot \lambda_0 \dots \cdot a_n \cdot \lambda_0.$$

При циклическом характере эксплуатации объекта происходит увеличение интенсивности отказов из-за увеличения нагрузок в моменты включения (выключения). Тогда интенсивность отказов:

$$\lambda = \lambda_p + I \cdot \lambda_{Ц},$$

где λ_p – интенсивность отказов объекта при непрерывном режиме работы; I – средняя частота включений; $\lambda_{Ц}$ – интенсивность отказов на один цикл включений.

14.3. ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ И ОБЪЕМА ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ

Среди мероприятий по повышению надежности при эксплуатации систем важное место отводится техническому обслуживанию. Под техническим обслуживанием понимается комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на предупреждение отказов.

К основным задачам технического обслуживания (ТО) относят:

- предупреждение ускоренного износа, коррозии и старения;
- поддержание основных технических характеристик оборудования на заданном уровне;
- продление межремонтных сроков эксплуатации оборудования.

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

Сущность влияния профилактики на надежность можно пояснить с помощью кривых (рисунок 48):

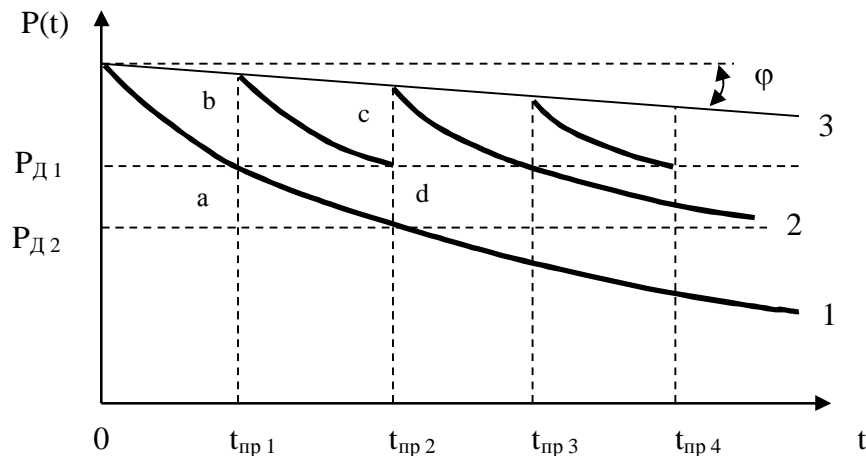


Рисунок 48

Кривая 1 выражает изменение вероятности $P(t)$ безотказной работы элемента в предположении отсутствия профилактики.

В ходе проведения профилактических работ выявленные отказы устраняются. При этом кривая $P(t)$ получает характерный, так называемый

«пилообразный» вид (кривая 2). В моменты $t_{ППi}$ выполняются профилактические работы, и в дальнейшем кривая $P(t)$ имеет начало на линии, близкой к максимальному значению вероятности работоспособного состояния. Из-за воздействия факторов внешней среды надежность постепенно ухудшается. Кроме того, после выполнения профилактики могут остаться неисправные элементы, которые не были обнаружены обслуживающим персоналом в ходе проверки работоспособности объектов.

Количественно это отражается наклоном линии на угол φ относительно прямой максимума вероятности $P(t)$ в момент времени $t = 0$. Эту линию называют линией ухудшения (прямая 3).

Принципиально линия ухудшения может быть не прямой и иметь начало на оси ординат не обязательно в точке, соответствующей $P(t = 0) = 1$, так как сложные объекты, покидая завод-изготовитель, не имеют вероятности безотказной работы, равной единице.

Участок ab кривой 2 показывает, насколько восстанавливается надежность оборудования при проведении профилактики. Недовосстановление надежности до начальной величины с течением времени эксплуатации растет. Может наступить момент, когда надежность не будет восстанавливаться за счет профилактики. Этот момент времени указывает на необходимость проведения более эффективных работ (средний или капитальный ремонт).

Снижение надежности в недопустимых пределах (ниже значений $P_{Д1}$ и $P_{Д2}$) может привести к отказам в работе. Значение допустимой вероятности $P_{Д}$ выбирается на основании анализа эффективности оборудования.

Периодичность выполнения профилактики существенным образом влияет на значение вероятности безотказной работы $P(t)$. Так, если периодичность профилактики равна промежутку времени от момента $t = 0$ до $t = t_{ПП2}$ и т. д., то значение вероятности безотказной работы описывается «зубом пилы» 1,0–b–d. С уменьшением времени между профилактическими работами в два раза вероятность безотказной работы систем повышается и определяется «зубом пилы» 1,0–a–b, b–d–c и т. д. При назначении периодичности профилактики необходимо промежутки времени между циклами работ выбирать так, чтобы обеспечить требуемое значение вероятности безотказной работы.

Планирование профилактики зависит от того, насколько вероятны ожидаемые отказы различной природы. Если отказы – редкие события и носят характер внезапных отказов, то не имеет смысла проводить частые плановые замены элементов, поскольку заменяемый элемент не будет менее надежен, чем новый, и замена его может привести не к повышению, а к снижению надежности. При постепенных отказах плановая замена элементов может существенно повысить надежность системы, если замена своевременна.

При заданных значениях вероятности безотказной работы можно оценить периодичность профилактики:

$$Q_{\text{доп}} = 1 - P_{\text{Д}} = 1 - e^{-\lambda t_{\text{пр}}}, \quad t_{\text{пр}} \leq \frac{\ln(1 - Q_{\text{доп}})}{\lambda}.$$

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

Время профилактической проверки работоспособности оборудования назначается при учете следующих соображений.

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

2. Для определения времени календарного обслуживания объектов, работающих длительно в непрерывном режиме и ориентированных на замену элементов, выработавших ресурс, предварительно оценивается средняя наработка до постепенного отказа T и среднее квадратическое отклонение наработки $\sigma_T(t)$ (рисунок 49).

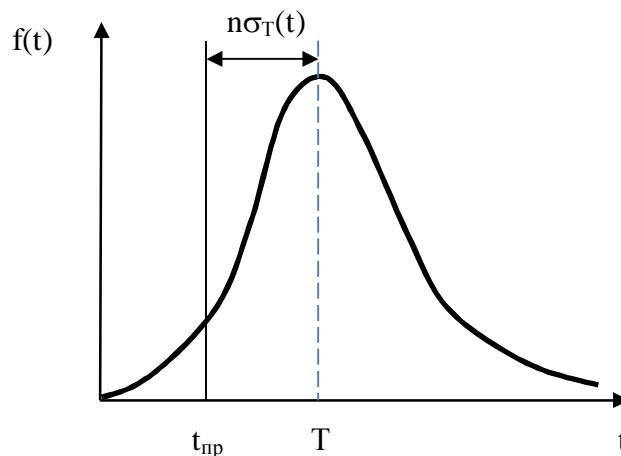


Рисунок 49

Тогда $t_{\text{пр}} = T - n\sigma_T(t)$. Число n выбирается таким, чтобы вероятность отказа была меньше допустимой вероятности.

3. На λ -характеристиках объектов в различные моменты времени могут появляться «горбы» (рисунок 50), которые характеризуют разный ресурс элементов (в объекте могут быть элементы с разной механической и электрической прочностью).

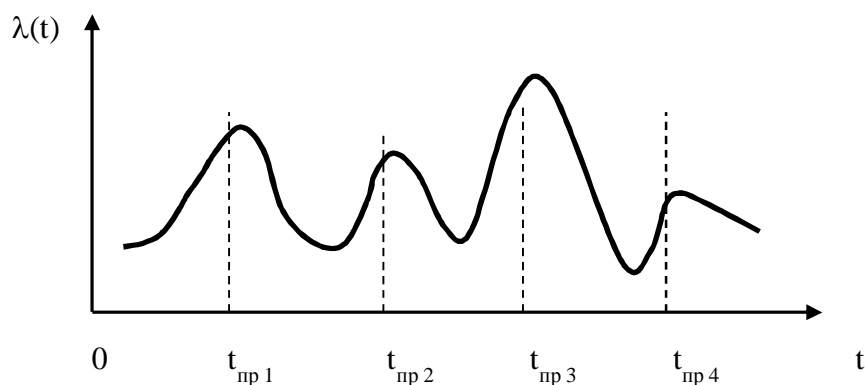


Рисунок 50

В моменты $t_{пр}$ целесообразно проводить профилактику соответствующего объема (глубины).

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

$$R = K_{ТИ}P(t),$$

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

Работы по техническому обслуживанию объектов в процессе эксплуатации осуществляют двумя способами:

- регулярно, через заранее выбранные промежутки времени;
- в зависимости от фактического состояния объекта (обслуживание по состоянию).

14.4. ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛАССА, ГРУППЫ НАДЕЖНОСТИ И РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Классы, на которые делят объекты:

Класс 1 – невосстанавливаемые объекты для общего пользования, а не специально созданные для систем ЖАТ. К ним относятся конденсаторы, резисторы, полупроводниковые приборы и др.

Класс 2 – невосстанавливаемые объекты для применения в системах ЖАТ. Например, к ним относят светофорные лампы.

Класс 3 – восстанавливаемые объекты всех видов, предназначенные как специально для устройств ЖАТ, так и для общего пользования. К ним относят стрелочные электроприводы, релейные блоки, комплексное оборудование и узлы и пр.

Объекты по группе надежности:

Группа 1 – объекты, у которых все предполагаемые отказы должны привести устройство в безопасное или защитное состояние для движения поездов с целью предотвращения прямой угрозы жизни людей, значительного материального и морального ущерба (устройства ЭЦ, автоблокировки, переездной автоматики, рельсовые цепи, реле СЦБ первого класса, компараторы мажоритарных систем и т. д.).

Группа 2 – объекты, отказы которых непосредственно не влияют на безопасность движения поездов, а приводят к задержкам в их движении (диспетчерская централизация, лампы накаливания и др.).

Группа 3 – объекты, которые непосредственно не влияют на безопасность движения поездов, их отказы не оказывают значительного влияния на работоспособность устройств ЖАТ и на бесперебойность движения поездов (диспетчерский контроль, индикаторные и диагностические элементы и др.).

Перечень показателей надежности устанавливается для каждого объекта в зависимости от класса, группы надежности и режима эксплуатации.

При этом все технические объекты условно делят на три группы:

– объекты, предназначенные для работы в системах, эффективность функционирования которых может быть оценена экономическими критериями;

– объекты, функционирование которых связано с обеспечением безопасности;

– объекты, для которых нельзя заранее определить условия их использования.

Для объектов первой группы выбор показателей надежности определяется режимом их применения. К ним относятся либо числовые (коэффициент готовности, вероятность безотказной работы), либо интервальные (наработка на отказ, наработка до отказа) показатели надежности.

При выборе показателей надежности для объектов второй группы руководствуются условиями обеспечения безопасности с учетом процессов, происходящих после появления отказов.

Для третьей группы объектов в качестве основных показателей надежности назначают любую полную характеристику надежности. Для невосстанавливаемых объектов – вероятность безотказной работы $P(t)$, или плотность распределения наработки до отказа $f(t)$, или интенсивность отказов $\lambda(t)$. Для восстанавливаемых – вероятность безотказной работы в течение заданного интервала времени $P(\Delta t)$, параметр потока отказов $\omega(t)$, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности.

В каждом конкретном случае вопрос об определении показателей надежности решают индивидуально.

Лекция 15

15.1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ЗАПАСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Опыт эксплуатации сложных объектов показывает, что время восстановления работоспособности после отказа зависит от наличия запасных элементов. Отсутствие запасных элементов даже при хорошей ремонтно-пригодности объекта приводит к значительному увеличению времени восстановления. Термином ЗИП принято называть запас сменных изделий, материалов, инструментов и принадлежностей для обслуживания объектов. Сокращенно ЗИП – запас изделий и принадлежностей.

Внедрение в практику научно обоснованных методов расчета количественного состава ЗИП ведет к улучшению характеристик восстанавливаемости и достижению большого экономического эффекта.

Используются следующие структуры системы ЗИП:

- одиночный комплект ЗИП придается непосредственно объекту с целью обеспечения его надежности при длительном использовании;
- групповой комплект ЗИП придается группе объектов для пополнения одиночных комплектов по мере их расходования или для обеспечения надежности изделий по тем элементам, которые отсутствуют в номенклатуре одиночных комплектов;
- ремонтный комплект ЗИП придается ремонтному органу.

Существует зависимость между числом запасных элементов и вероятностью того, что на заданном интервале времени работы t объект не будет простаивать из-за отсутствия необходимых запасных элементов.

Количество запасных элементов зависит от интенсивности их отказов, от времени пополнения ЗИП, требуемой его достаточности и организации снабжения.

Количественно ЗИП зависит от интенсивности отказов λ заменяемых элементов и времени пополнения ЗИП $t_{\text{п}}$. Чем больше λ и $t_{\text{п}}$, тем большее количество запасных изделий потребуется при эксплуатации.

Количество необходимых элементов в ЗИП можно определить двумя основными способами: на основании статистических данных по эксплуатации систем (или их аналогов) и расчетом в сочетании со статистическим моделированием.

Первый метод (инженерный) позволяет практически без выполнения расчетов принимать решение о включении элементов в номенклатуру запасных частей. Количество запасных элементов определяется исходя из данных по эксплуатации объектов или их аналогов. Такой способ приемлем только при длительной эксплуатации объектов и достаточно большой базы данных о надежности их элементов.

Второй метод (расчетный) используется при проектировании совер-

шенно новых, не имеющих аналогов объектов. Он основан на результатах структурно-логического анализа надежности технических систем с использованием методов оптимизации структурного резервирования.

Задача расчета количественного состава ЗИП в общем виде может быть сформулирована следующим образом.

Имеется невосстанавливаемая система непрерывного действия, которую можно представить в виде комплекса, состоящего из однотипных последовательно соединенных по надежности элементов, имеющих интенсивность отказов, равную λ . Поток отказов считается простейшим. Требуется определить необходимое число запасных элементов для обеспечения бесперебойной работы системы в течение времени t .

При отказе вместо отказавшего элемента каждый раз из запаса будет изыматься новый элемент. Поэтому число израсходованных элементов z за время t будет равно числу возникших отказов n за это же время.

Вероятность $P_z(t)$ того, что за время t система потребует точно z запасных элементов (число замен), определится по формуле Пуассона:

$$P_z(t) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^z}{z!}.$$

Среднее число расходуемых элементов z_{cp} за время эксплуатации t равно

$$z_{cp} = M[z] = e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(\lambda t)^j}{j!}.$$

В силу случайности возникающих в объекте отказов может потребоваться либо большее, либо меньшее число запасных элементов, чем z_{cp} . Поэтому гарантийная вероятность того, что за время t будет израсходовано не больше, чем z_{cp} запасных элементов, равна всего лишь 50 %.

На практике при эксплуатации объектов в условиях, затрудняющих доставку запасных элементов, гарантийная вероятность того, что потребуется больше, чем запасных элементов, равная 50 %, является недостаточной.

Определить число запасных элементов z_γ , если требуется заданная гарантийная вероятность в работоспособности объекта γ , можно из соотношения:

$$\gamma = P_\gamma(t) = e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^{z_\gamma} \frac{(\lambda t)^j}{j!}.$$

Модель работы объекта с ЗИП соответствует модели работы объекта с холодным резервированием.

Вероятность безотказной работы системы в этом случае определяется выражением:

$$P_C(t) = e^{-\lambda_C t} \sum_{n=0}^m \frac{(\lambda_C t)^n}{n!},$$

где m – число резервных элементов, λ_C – интенсивность отказов объекта, t – заданное время эксплуатации.

Это выражение можно использовать для расчета необходимого количества ЗИП, если под m понимать число элементов в ЗИП, а под временем t – время на которое рассчитывается ЗИП. Таким образом, если задать вероятность безотказной работы объекта при известных интенсивностях отказов элементов, можно рассчитать, сколько элементов необходимо иметь в ЗИП.

Введем в рассмотрение понятие коэффициента запаса, который равен:

$$K_3 = \frac{z_\gamma}{z_{cp}}$$

Для обеспечения вероятности выполнения объектов своих функций в запасе необходимо иметь не z_{cp} , а $z_\gamma = K_3 z_{cp}$ элементов. Коэффициент запаса $K_3 > 1$ рассчитывается в зависимости от задаваемого значения вероятности γ .

При расчете числа запасных элементов необходимо учитывать не только интенсивность отказов λ , но и другие эксплуатационные расходы, которые связаны с профилактической заменой элементов z_{np} , ухудшением параметров элементов при хранении z_{xp} , расходом элементов при транспортировке и др.

Тогда суммарное эксплуатационное количество запасных элементов z_Σ можно представить в виде суммы: $z_\Sigma = z_\gamma + z_{np} + z_{xp}$.

При допущении простейшего потока отказов при хранении, значение z_{xp} равно:

$$z_{xp} = K_3 + \lambda_{xp} N t_{xp},$$

где λ_{xp} – интенсивность отказов элементов при хранении; N – количество хранящихся элементов; t_{xp} – время хранения элементов.

Не все элементы ЗИП будут храниться до конца срока t_{xp} , так как часть элементов расходуется в течение этого срока. Поэтому значение z_{xp} может быть уменьшено. Если предположить расход элементов ЗИП в течение срока t_{xp} равномерным, то приближенно z_{xp} равно:

$$z_{xp} = 0.5K_3 + \lambda_{xp} N t_{xp}.$$

В случае восстанавливаемых элементов схема использования ЗИП может быть описана так. Отказ элемента происходит с интенсивностью λ . Отказавший элемент ремонтируется и поступает на пополнение ЗИП. Если время ремонта небольшое, то количество элементов i -го типа в ЗИП по сравнению со случаем невосстанавливаемых элементов меньше. Оптимальный вариант состава ЗИП и сроков его пополнения рассчитывается методом последовательного приближения: в начале эксплуатации ЗИП определяется по изложенной ранее методике, а затем корректируется с учетом характера потока отказов и восстановления системы.

Лекция 16

16.1. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Надежность объектов закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и расходуется при эксплуатации. Поэтому методы повышения надежности рассматриваются на трех этапах жизненного цикла объектов.

Классификация методов повышения надежности.

Методы повышения надежности объектов включают в себя: резервирование, уменьшение интенсивности отказов элементов, сокращение времени непрерывной работы, уменьшение времени восстановления, выбор рациональной периодичности и объема контроля объекта.

Надежность закладывается при проектировании и изготовлении. От работы проектировщика зависит, как будет работать объект в условиях эксплуатации. В процессе проектирования используются схемные и конструктивные методы повышения надежности.

Схемные методы включают в себя: создание схем с минимально необходимым числом элементов, резервирование, разработку схем, не допускающих опасных последствий отказов элементов, оптимизацию последовательности работы элементов схемы, предварительный расчет надежности проектируемой схемы. Уменьшение числа элементов приводит к увеличению вероятности безотказной работы объекта, а также благоприятно сказывается на массе, габаритах и стоимости. Но сокращение числа элементов не должно увеличивать коэффициент нагрузки у оставшихся элементов, в противном случае эффект может быть прямо противоположным.

Резервирование является наиболее эффективным методом повышения надежности. При резервировании в конструкции объекта заранее предусматривается возможность замены отказавшего элемента. При создании схем с ограниченным последствием отказов применяются специальные защитные и предохранительные устройства, которые предотвращают аварийные последствия отказов.

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

В число конструктивных методов повышения надежности входят:

- использование элементов с малой величиной интенсивности отказов при заданных условиях эксплуатации;
- обеспечение благоприятного режима работы элементов;
- рациональный выбор совокупности контрольных параметров;

- рациональный выбор допусков на изменение основных параметров элементов и систем;
- защита элементов от вибраций и ударов;
- унификация элементов и систем;
- разработка эксплуатационной документации с учетом опыта применения системы, подобной конструируемой;
- обеспечение эксплуатационной технологичности конструкции (применение встроенных контрольных устройств, автоматизация контроля и индикация неисправностей, удобство подходов для обслуживания и ремонта).

Способы повышения надежности при производстве:

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

Перечисленные методы повышения надежности должны применяться в совокупности с учетом влияния каждого из них на работоспособность объекта.

Методы повышения надежности систем в эксплуатации могут быть разбиты на две группы. В первую группу входят все изложенные методы. На основе изучения опыта эксплуатации инженер-эксплуатационник имеет возможность разработать ряд рекомендаций для проектировщиков, направленных на улучшение качества объектов (изменение схемы, замена элементов, изменение конструкции, материалов и др.). Вторая группа мероприятий относится к воздействию обслуживающего персонала.

К этим мероприятиям относят:

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

Надежность объекта в процессе эксплуатации можно поддерживать на определенном уровне, который заложен при проектировании и изготовлении. Превзойти же этот уровень невозможно. Объекты, находящиеся в эксплуатации, обладают так называемой «встроенной» надежностью с параметром T_{CP} . Под встроенной надежностью понимается рассчитанное конструктором значение средней наработки на отказ. Это значение определяется исходя из интенсивности отказов λ элементов, которые получены для условий работы, оговоренных в техническом задании, и необходимости выполнения функций, предписанных инструкций по эксплуатации.

Параметр встроенной надежности можно определить из выражения:

$$T_{\text{ср}} = \frac{t}{n} = \frac{1}{n_{\text{пост}} + n_{\text{вн}}},$$

где n – общее число отказов за период работы t ; $n_{\text{пост}}$ – ожидаемое расчетное число постепенных отказов; $n_{\text{вн}}$ – среднее число внезапных отказов.

В процессе эксплуатации объекта можно воздействовать на величину фактического уровня параметра надежности $T_{\text{ср}}$, который может измениться в зависимости от эффективности обслуживания объектов.

Вероятность выявления дефектного элемента в процессе обслуживания и предотвращение постепенного отказа в интервале времени t равна:

$$P(t) = \frac{n_{\text{пост}}}{n_{\text{пост}} + n_{\text{вн}}} \left(1 - e^{-\frac{t}{t_n}} \right),$$

где t_n – среднее время на обнаружение дефектного элемента.

Время t_n зависит от числа обслуживаемых элементов, методики и производительности аппарата прогнозирования, от квалификации и опыта работы обслуживающего персонала. Следовательно, величина $P(t)$ определяется процессом эксплуатации объекта и число постепенных отказов может быть уменьшено до значения

$$n_{\text{пост}}^{\text{э}} = n_{\text{пост}}(1 - P) < n_{\text{пост}}.$$

Когда реальные условия эксплуатации мало отличаются от расчетных условий, усилиями обслуживающего персонала воздействие внешних факторов может быть ослаблено. Тогда интенсивность отказов элемента в условиях эксплуатации будет меньше расчетной. В этом случае число внезапных отказов элементов уменьшится.

$$n_{\text{вн}}^{\text{э}} = \lambda_{\text{э}} t < n_{\text{вн}}.$$

Таким образом:

$$T_{\text{ср}} = \frac{t}{n_{\text{пост}}^{\text{э}} + n_{\text{вн}}^{\text{э}}} > T_{\text{ср}}.$$

В этом заключается сущность активного воздействия эксплуатационных мероприятий по повышению надежности.

Организационные мероприятия по повышению надежности объектов:

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

16.2. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Резервирование является одним из распространенных способов повышения надежности объектов. Однако он ведет к усложнению объектов, увеличению их массы и стоимости. За критерий качества объекта в смысле надежности принимается следующий: объект считается абсолютно надежным, если отказ одного любого элемента не приводит к отказу всего объекта. Реализация критерия осуществляется путем поэлементного или поблочного резервирования.

Оценить эффективность различных способов резервирования можно, приняв за критерии качества вероятность и наработку на отказ и сделав следующие упрощающие предположения: все элементы системы равнонадежны, поток отказов элементов является простейшим, кратность резервирования всех элементов одинакова.

Если при принятых допущениях вероятность и средняя наработка до отказа нерезервированной системы выражается формулами

$$P_o(t) = e^{-N\lambda t}, \quad T_{CP} = \frac{1}{N\lambda},$$

то выигрыш надежности резервированной системы по сравнению с нерезервированной будет равен

$$G_Q = \frac{Q}{Q_o}, \quad G_T = \frac{T_{CP}}{T_{CPo}}, \quad G_\lambda = \frac{\Lambda}{\Lambda_o},$$

где Λ_o – интенсивность отказов нерезервированного объекта; λ – интенсивность отказов элементов; Λ_a – интенсивность отказов автомата надежности; m – кратность резервирования; N – число элементов в объекте; k – число элементов, отказ которых не приводит к отказу объекта.

Из анализа применения методов резервирования вытекают следующие выводы:

1. Интенсивность отказов резервированного объекта всегда начинается с нуля независимо от интенсивности отказов нерезервируемого объекта. По мере увеличения времени эксплуатации, интенсивность отказов резервированного объекта стремится к интенсивности отказов нерезервированного объекта. При резервировании с дробной кратностью интенсивность отказов резервированного объекта при определенных значениях m и t может быть больше интенсивности отказов нерезервированной системы. Это означает, что объект, у которого применено резервирование с дробной кратностью, может быть менее надежным, чем нерезервированный. Существует критическое значение времени работы, выше которого резервирование с дробной кратностью нецелесообразно.

2. Выигрыш надежности по вероятности отказа тем больше, чем меньше интенсивность отказов нерезервированного объекта. Это основное противоречие всякого резервирования. Для повышения надежности объектов длительного использования необходима высокая кратность резервирования.

3. При схемной реализации любого резервирования, кроме скользящего, значительное увеличение массы приводит к менее значительному увеличению наработки на отказ.

16.3. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ

Вероятность безотказной работы системы, интенсивность отказов которой уменьшена в k раз, равна

$$P(t) = e^{-\frac{\Lambda_o t}{k}}.$$

Тогда выигрыш надежности составляет:

$$G_Q = \frac{1 - e^{-\frac{\Lambda_o t}{k}}}{1 - e^{-\Lambda_o t}}, \quad G_T = k, \quad G_A = \frac{1}{k}.$$

При малых $\Lambda_o t$ выигрыш надежности по наработке на отказ растет пропорционально k . Уменьшение интенсивности отказов приводит к существенному повышению надежности объектов длительного использования и значительному повышению надежности объектов, предназначенных для малого времени работы.

Эффективными методами понижения интенсивности отказов объектов являются: применение наиболее надежных элементов, отбраковка («выжигание») малонадежных элементов системы, облегчение режимов работы элементов.

Выбор наиболее надежных элементов.

При проектировании объектов недопустимо применение объектов с устаревшими типами элементов. С этой целью разрабатываются специальные нормы надежности элементов и объектов в зависимости от назначения. Надежность элементов не всегда удовлетворяет высоким требованиям при создании сложных объектов. Кроме этого, при выборе элементов необходимо учитывать реальные условия эксплуатации объектов.

Отбраковка («выжигание») малонадежных элементов.

Уменьшить интенсивность отказов можно путем отбраковки, или «выжигания», элементов, имеющих конструктивные и производственные дефекты. Для этого осуществляется тренировка элементов в тяжелых

условиях работы. Идея метода выжигания дефектных элементов состоит в исключении начального участка λ -характеристики (периода приработки).

Для большинства элементов с увеличением коэффициента нагрузки K_H кривая $\lambda = f(t)$ смещается влево вверх. При этом участок, где $\lambda = const$, сокращается, и начало этого участка смещается влево.

Численное значение времени выжигания определяют путем проведения специальных испытаний при различных коэффициентах нагрузки K_H и на основании статистических данных об отказах. По полученным сведениям строят графики $\lambda = f(t)$ и по характеру их изменения устанавливают коэффициент нагрузки и время выжигания.

Облегчение режимов работы элементов.

Снижение нагрузки элементов, уменьшение их тепловых, вибрационных и других режимов приводит к уменьшению вероятности появления отказа. Поэтому облегчение режимов работы является одним из возможных путей повышения надежности оборудования. В подавляющем большинстве современных систем элементы работают в разгруженном режиме.

Для ряда элементов определены зависимости интенсивности отказов от коэффициента нагрузки. Например, зависимость интенсивности отказов элементов электронных схем от значений K_H довольно точно можно представить формулой

$$\lambda = a \cdot K_H \cdot [(b \cdot K_H)^2 + 1]^{n \cdot K_H},$$

где a , b , n – коэффициенты, зависящие от типа элемента.

Если элементы работают в режимах, близких к номинальным, то понижение коэффициента нагрузки дает менее значительный эффект. Облегчение режимов работы элементов означает, что в объект ставятся элементы, имеющие запас по прочности или мощности.

16.4. СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ НЕПРЕРЫВОЙ РАБОТЫ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ

При экспоненциальном распределении времени появления отказов в выражениях для основных количественных характеристик надежности значения λ и t входят в виде произведений. Это означает, что сокращение времени работы эквивалентно уменьшению интенсивности отказов. Для подавляющего числа объектов важным является такое свойство, как готовность к действию. Готовность системы к выполнению своих функций характеризуется коэффициентом готовности

$$K_G = \frac{T}{T + T_B}.$$

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

Мероприятия по улучшению восстанавливаемости объектов на этапе их создания включают в себя: автоматизацию процесса обнаружения неисправностей; автоматизацию контроля основных параметров и режимов работы; резервирование; рациональное конструирование; разработку эксплуатационной документации.

Указанные факторы влияют на следующие показатели: среднее время пребывания объекта в ожидании ремонта и его проведения; среднее время доставки запасных элементов; среднее время удовлетворения рекламаций; потребное количество запасных элементов в ЗИП и др.

Усилия обслуживающего персонала должны быть направлены на проведение наиболее эффективных мероприятий по повышению восстанавливаемости объектов, основными из которых являются: повышение квалификации персонала и приобретение ими устойчивых навыков поиска и замены отказавших элементов; обоснование рациональной периодичности и объема профилактических мероприятий; определение оптимального состава ЗИП; обоснование и разработка оперативной системы снабжения; совершенствование методов эксплуатации и систем учета и отчетности; усовершенствование эксплуатационной документации.

Лекция № 17

17.1. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Методы прогнозирования состояния технических объектов, основанные на изучении происходящих в них процессов, способны значительно уменьшить влияние случайных факторов, более точно описать поведение объектов и возможность появления отказов. Однако для оценки надежности элементов по данным о приближении к отказам необходимо составить модели процессов, происходящих в элементах и приводящих к их отказам.

Выбор модели надежности производится на основании статистического анализа данных о функционировании объектов при испытаниях или в условиях эксплуатации.

Для решения многих исследовательских и проектных задач в инженерной практике используются методы *имитационного моделирования* процессов и систем, в том числе на электронных вычислительных машинах. При этом исследуется не сам технический объект, а его физическая или математическая модель в виде алгоритма функционирования, отражающая все основные существенные свойства и характеристики объекта. Основной целью имитационного моделирования является получение новой информации о свойствах, характеристиках и поведении изучаемого реального технического объекта.

В зависимости от степени физического сходства между оригиналом и моделью можно различать *моделирование на основе подобия* и *моделирование по аналогии*.

При моделировании на основе подобия создается подобная оригиналу материальная система (физическая модель), с помощью которой изучаются процессы, протекающие в оригинале. Системы или явления называются *подобными*, если все количественные характеристики одного из них можно получить пропорциональным преобразованием характеристик другого. Достоинства моделирования на основе подобия – достоверность результатов и возможность выявления физических причин явлений.

Под *аналогией* понимается частичное сходство между предметами и явлениями, в остальном различными.

Математическое моделирование – процесс создания имитирующей математической модели и ее использование с целью получения сведений о реальном объекте. Математическое моделирование является альтернативой физическому моделированию. У него есть ряд существенных преимуществ: меньшие сроки на подготовку, значительно меньшая материалоемкость, возможность выполнения экспериментов на критических и закритических режимах, которые привели бы к разрушению образца, и др.

Математическая модель – совокупность математических объектов (чисел, символов, множеств и т. д.) и связей между ними, отражающих важнейшие свойства технического объекта.

Определение показателей надежности на основании вероятностных моделей включает три этапа. Сначала устанавливается тип модели (вид распределения). Это может быть сделано на основании известных законов распределения, полученных для объектов-аналогов. На втором этапе оцениваются параметры распределения, устанавливается конкретный вид вероятностной модели для данного технического объекта. На третьем этапе, на основании полученной вероятностной модели, определяются необходимые показатели надежности.

17.2. ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Дискретные распределения описывают случайные величины, которые принимают конечное или счетное множество значений (число отказов, число исправных или отказавших объектов и т. д.).

Биномиальное распределение определяет вероятность k успешных испытаний из общего числа испытаний n , если известно, что вероятность одного успешного испытания равна p , или число k исправных элементов системы, состоящей из n элементов, если вероятность безотказной работы каждого элемента равна p :

$$P(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k (1-p)^{n-k} = C_n^k p^k (1-p)^{n-k},$$

где C_n^k – биномиальные коэффициенты.

При достаточно большом числе n и малых значениях p биномиальное распределение хорошо аппроксимируется распределением Пуассона с параметром $\lambda = np$ и ошибкой аппроксимации порядка λ^2/n

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda),$$

или нормальным распределением

$$P\left(\left|\frac{k}{n} - p\right| \geq \varepsilon\right) = 1 - 2\Phi\left(\varepsilon \sqrt{\frac{n}{p(1-p)}}\right),$$

где $\Phi(z)$ – нормированная функция Лапласа.

Биномиальное распределение характерно для вероятности появления в объекте k отказов за время или наработку t , если известно, что вероятность появления отказа в одном из n интервалов t/n равна p .

При $n \rightarrow \infty$ можно использовать распределение Пуассона в виде

$$P(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} \exp(-\lambda t).$$

При $k = 0$ распределение можно рассматривать как вероятность безотказной работы (вероятность отсутствия отказа) за время t

$$P(k = 0) = \exp(-\lambda t).$$

Отрицательное биномиальное распределение (распределение Паскаля)

$$P(n) = C_{k+n-1}^n p^k (1-p)^n$$

используется, например, для определения вероятности числа неисправных изделий n , предшествующих k -му исправному, при планировании выпуска изделий для получения заданного количества исправных изделий при известной вероятности брака p .

При $k = 1$ отрицательное биномиальное распределение приобретает вид *геометрического распределения*.

Гипергеометрическое распределение используется для определения надежности продукции при выборочном контроле качества и определяет вероятность числа годных изделий k в выборке объема n из партии объемом N , содержащей M годных изделий:

$$P(k) = \frac{C_M^k C_{N-M}^{n-k}}{C_N^n}.$$

17.3. НЕПРЕРЫВНЫЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

В *непрерывных распределениях* в теории надежности непрерывной случайной величиной обычно является время или наработка – время безотказной работы, появления отказа, восстановления, наработка на отказ, между отказами, до отказа и т. д.

Наиболее простой и вместе с тем одной из самых используемых моделей является *экспоненциальное (показательное) распределение* наработки на отказ, которое получается из выражения основного закона надежности при постоянном значении интенсивности отказов $\lambda = const$

$$P(t) = \exp(-\lambda t).$$

Широкое использование экспоненциальной модели объясняется, в первую очередь, тем, что она описывает период нормальной эксплуатации, когда интенсивность отказов примерно постоянна и старение объекта еще мало сказывается на его надежности. Экспоненциальное распределение типично для технических систем, состоящих из большого количества элементов с различными распределениями наработки до отказа. Кроме того, экспоненциальное распределение описывает функционирование объекта

под действием пуассоновского потока импульсов нагрузки, обуславливающего отказы сложных систем с восстановлением элементов. Экспоненциальное распределение можно также рассматривать как предельное для распределения Пуассона и геометрического распределения.

При использовании экспоненциальной модели в качестве характеристики наработки объекта на отказ величину $T_0 = 1/\lambda$ можно рассматривать как среднюю наработку, и тогда выражение запишется в виде

$$P(t) = \exp(-t/T_0).$$

Существенным преимуществом экспоненциального закона является также возможность разложения функции в ряд и аппроксимации при $\lambda t = t/T_0 \leq 0,1$ линейной зависимостью вида

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots = 1 - \lambda t = 1 - \frac{t}{T_0},$$

которая часто используется при приближенных расчетах параметров надежности.

Важным свойством экспоненциальной модели надежности является то, что вероятность безотказной работы и вероятность отказа в интервале времени $(t, t+\Delta t)$ (т. е. $P(t, t+\Delta t)$ и $Q(t, t+\Delta t) = 1 - P(t, t+\Delta t)$) зависят только от длины этого интервала Δt и не зависят от предшествующего времени t . Это свойство в значительной степени ограничивает возможности использования этой модели – она может применяться только в случаях, когда необратимые изменения (старение) объектов несущественны и отказы связаны только со случайными воздействиями.

Экспоненциальное распределение можно обобщить *распределением Вейбулла* в виде

$$P(t) = \exp(-\lambda t^a).$$

В отличие от экспоненциального, распределение Вейбулла задается двумя параметрами. Параметр λ определяет масштаб кривой распределения (при его изменении кривая сжимается или растягивается). При значении параметра формы $a < 1$ модель Вейбулла позволяет описывать приработочные отказы, обусловленные скрытыми дефектами, при $a = 1$ – внезапные отказы в период нормальной эксплуатации, при $1 < a < 2$ – отказы быстростареющих объектов, у которых почти нет скрытых дефектов, при $a > 2$ – износные отказы. Кроме того, при $a = 2$ (*распределение Релея*) модель описывает функционирование объекта, состоящего из нескольких последовательно соединенных дублированных элементов. Обычно значение a лежит в интервале от 1 до 2.

Гамма-распределение

$$P(t) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t t^{\alpha-1} \exp(-\lambda t) dt$$

используется для определения момента отказа с номером a при испытаниях с заменой элементов, если наработка подчиняется экспоненциальному закону, а также для определения общего срока службы группы объектов при испытаниях без замены (также при экспоненциальном законе) и в некоторых других случаях.

Одним из самых популярных в теории надежности является *нормальное распределение*

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt.$$

Фундаментальное значение нормального распределения связано с центральной предельной теоремой теории вероятностей, согласно которой распределение суммы любых случайных величин в пределе стремится к нормальному. Нормальное распределение чаще всего используется для описания постепенных износных отказов, оно образуется, когда на случайную величину действует большое количество равноправных факторов. Его недостатком в некоторых случаях может оказаться наличие области отрицательных значений аргумента, что для описания наработки на отказ не имеет смысла. С целью устранения этого недостатка можно воспользоваться *усеченным нормальным распределением*

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{c}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt,$$

или *логарифмически нормальным распределением*

$$P(t) = 1 - F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt.$$

Логарифмически нормальное распределение может использоваться для описания долговечности металлов, износных отказов материалов, старения электронной аппаратуры, процессов восстановления некоторых объектов и т. д.

При описании надежности используются также модели, объединяющие несколько распределений. Например, если отказы объекта происходят под действием двух независимых факторов, приводящих к отказам по экспоненциальному и нормальному законам, то результирующая модель будет представлять собой композицию (произведение) этих распределений.

17.4. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Если случайные величины, значения которых оказывают определяющее влияние на работоспособность, распределены по сложным законам или являются дискретными случайными величинами, одновременно на надежность элемента влияют множественные случайные факторы, то аналитический расчет надежности становится практически неразрешимой задачей.

В этом случае для прогнозирования поведения элементов используют метод статистического имитационного моделирования – метод Монте-Карло. Указанный метод является практически универсальным для определения закона распределения параметров состояния технических объектов и расчетов надежности.

Основная идея метода Монте-Карло заключается в многократном расчете определяющего параметра по известным зависимостям, описывающим процесс потери работоспособности. Каждое статистическое испытание позволяет получить одну реализацию случайного процесса. Множество реализаций случайного процесса дает возможность оценить ход процесса и его основные параметры.

В общем случае значение определяющего параметра X определяется набором случайных величин Z_i ($i = 1, 2, \dots, n$), законы распределения которых известны, то есть

$$X = X(Z_1, Z_2, \dots, Z_n).$$

Последняя зависимость может быть задана как одной, так и несколькими расчетными формулами, алгоритмами, таблицами, графиками и т. д.

Так как аргументами функции являются случайные величины, то и параметр X является случайной величиной.

На первом этапе применения метода Монте-Карло в зависимости от необходимой точности определения характеристик надежности выбирается необходимое число реализаций N . Затем из заданного диапазона изменения каждого из аргументов Z_i по известным законам распределения случайным образом с использованием таблицы или генератора случайных чисел выбирается по N значений каждого из аргументов:

$$\begin{array}{l} Z_1 \in z_{11} \quad z_{12} \quad \dots \quad z_{1j} \quad \dots \quad z_{1N} \\ Z_2 \in z_{21} \quad z_{22} \quad \dots \quad z_{2j} \quad \dots \quad z_{2N} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ Z_i \in z_{i1} \quad z_{i2} \quad \dots \quad z_{ij} \quad \dots \quad z_{iN} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ Z_n \in z_{n1} \quad z_{n1} \quad \dots \quad z_{nj} \quad \dots \quad z_{nN} \end{array}$$

После этого из полученных значений аргументов Z_i случайным образом выбираются N наборов значений, причем в каждом наборе присутствует по одному значению каждого аргумента Z_i .

Для каждого из наборов значений рассчитывается определяющий параметр X . Оценку вероятности безотказной работы получают непосредственно по значениям параметра X :

$$P = \frac{1}{N} N(X_{min} \leq X \leq X_{max}),$$

где $N(X_{min} \leq X \leq X_{max})$ – число реализаций параметра X , при которых его значение попало в интервал (X_{min}, X_{max}) .

Лекция 18

18.1. НАДЕЖНОСТЬ НАПОЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И АППАРАТУРЫ ЖАТ

Надежность рельсовых цепей и их элементов

Рельсовые цепи являются наименее надежными устройствами СЖАТ, что объясняется тяжелыми условиями их эксплуатации, связанными с действием постоянных динамических нагрузок от движения поездов, колебаний температуры и влажности окружающей среды, засорением балласта токопроводящими материалами. Запасы механической прочности соединительных и изоляционных материалов, применяемых в рельсовых цепях, невелики. Профилактические и ремонтные работы в них выполняются работниками служб сигнализации и связи, пути, электроснабжения, что усложняет работы по предотвращению и устранению отказов.

Параметр потока отказов рельсовых цепей для АБ на ряде участков железных дорог достигает $40 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, для ЭЦ достигает $55 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Наиболее характерными отказами рельсовых цепей являются:

- ухудшение или нарушение изоляции в стыке, стяжной полосе, серье, гарнитуре, в распорке крестовины (25 %);
- обрыв или плохой контакт соединителей, перемычек, джемперов (29,7 %);
- понижение сопротивления балласта (13 %);
- короткое замыкание рельсовых линий при путевых работах или посторонними предметами (18,7 %);
- отказы в работе путевых приемников вследствие посторонних источников питания, грозы, неправильной регулировки режима работы обслуживающим персоналом.

Нарушение изоляции в изолирующих стыках происходит из-за продавливания торцевой изоляции в жаркую погоду, разрушения боковой фибровой изоляции, продавливания втулок и шайб. Срок службы стыка определяется строгостью соблюдения технологии при сборке стыка, качеством содержания пути, климатическими особенностями участка, интенсивностью и скоростью движения поездов.

По данным МИИТа, средняя наработка изолирующего стыка по перевезенным грузам составляет 25–35 млн т. Параметр потока отказов изолирующих стыков колеблется в пределах $(2,25 - 10,5) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ для АБ и $(9,2 - 13,7) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ для ЭЦ.

С учетом того, что на сети железных дорог стран СНГ сейчас эксплуатируется около одного миллиона изолирующих стыков, становится понятной важность проблемы повышения их надежности. Основные пути повышения надежности изолирующих стыков – повышение качества их

сборки и технического обслуживания, переход на стыки с более качественной изоляцией, например на клееболтовые стыки или на изоляцию из стеклотекстолита вместо фибровой и капроновой изоляции.

Основными причинами обрыва стыковых соединителей приварного типа являются: коррозия, некачественная приварка, повреждения при путевых работах, потеря контакта между тросом и наконечником.

У штепсельных соединителей наиболее характерной причиной отказа является нестабильность сопротивления перехода штепсель-рельс. Параметр потока отказов стыковых соединителей находится в пределах $(11,0 - 16,5) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Поскольку на 1 км пути при длине рельса 25 м приходится не меньше 80 стыковых соединителей, их отказы достаточно часты.

Дублирование стыковых соединителей считается наиболее эффективным методом повышения надежности токопроводящих стыков рельсовой линии. Для обеспечения работоспособности токопроводящего стыка до замены отказавшего широко применяются временные стыковые соединители, которые вставляются под накладки с обеих сторон стыка, или используют два противоугона, соединенных между собой отрезком медного троса. Хороший эффект дает сплошной входной контроль соединителей, поступающих в дистанции, с отбраковкой негодных и дополнительным обжатием манжет медных приварных соединителей для улучшения контакта троса с манжетой.

Средний параметр потока отказов бутлежных перемычек составляет $1,54 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, стрелочных соединителей – $0,87 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, дроссельных перемычек – $0,35 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Снижение количества их обрывов добиваются улучшением конструкции наконечников и качества заделки в них троса. Повышение срока службы кабельных и дроссельных перемычек с уменьшением количества замыканий обеспечивает покрытие их полиэтиленовой изоляцией.

Сопротивление изоляции рельсовой линии может резко различаться на разных участках даже одной железной дороги в зависимости от вида и состояния балласта, типа и качества шпал, климатических факторов, наличия перевозимых сыпучих токопроводящих грузов. Средняя интенсивность отказов рельсовых цепей на сети дорог из-за сопротивления балласта сейчас находится в пределах $(5,0 - 7,5) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Кратковременные замыкания рельсовых цепей с интенсивностью $(7,0 - 10,5) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ происходят обычно при путевых работах: закорачивание снимаемым или устанавливаемым рельсом, закорачивание дефектоскопной тележкой или путевскими электроагрегатами с неисправной изоляцией, инструментом при замене стрелочных переводов, шпал и перешивке пути, закорачивание изолирующего стыка.

Грозовые разряды и короткие замыкания контактной сети приводят к выходу из строя устройств защиты рельсовой цепи, а в отдельных случаях к повреждению аппаратуры. Если тяговые токи в рельсовых линиях одного

пути заметно различаются (асимметрия тягового тока), то разность тяговых токов в полуобмотках дроссель-трансформаторов приводит к появлению мешающей ЭДС во вторичных их обмотках и на обмотках путевых реле.

Влияние низковольтных линий электропередачи и осветительных сетей может вызвать ложную занятость или ложную свободность рельсовой цепи.

В рельсовых цепях железных дорог и метрополитенов России эксплуатируются около 190 тысяч дроссель-трансформаторов (ДТ). Специфической причиной повреждения обмоток и выводов, разгерметизации ДТ является возникновение в обмотках (полуобмотках) усилий до 160 кгс в радиальном направлении от импульсов с амплитудой до 10–15 кА и длительностью 400–500 мс переменного тягового тока или 60–100 мс постоянного тягового тока. Импульсы возникают при трогании поездов и коротких замыканиях в контактной сети.

Профилактическое обслуживание и диагностика отказов рельсовых цепей затрудняются отсутствием серийных удобных в работе индикаторов и измерительных приборов для контроля их параметров.

Надежность электроприводов

Стрелочные электроприводы являются причиной в среднем пятой части отказов в системах ЭЦ. Параметр потока отказов в зависимости от их типа и условий эксплуатации равен $(6,7-40,0) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Более половины отказов происходит из-за обрывов цепи на контактах автопереключателя, 17–24 % отказов генерируют электродвигатели, 3,5–12,3 % отказов происходят в механических передачах, до 11,4 % отказов вызвано нарушением контакта блокировочного устройства, на заклинивание шибера приходится 1,5–7,0 отказов.

Более трети отказов автопереключателей являются следствием неправильной регулировки пружин контактных колодок и недостаточной глубины врубания ножей. Почти столько же отказов приходится на излом колодок, контактов, рычагов, контрольных линеек. Излом контактных колодок происходит из-за некачественного выполнения работ по техническому обслуживанию, когда врубающиеся ножи разбивают колодки, а также вследствие появления трещин при низких температурах в местах сопряжения металла с пластмассой. Использование для изготовления колодок премикса вместо карболита исключает эти отказы. Своевременная замена карболитовых колодок после выработки назначенного ресурса также дает хороший эффект.

Около трети отказов автопереключателей вызвано загрязнением и индееванием контактов. Для предотвращения индеевания используют обогрев, смазку графитом или глицерином, специальные насечки на ножах, колпачки из оргстекла и т. д.

Некачественное техническое обслуживание приводит к нестабильности в работе фрикционного устройства при перекосе трущихся поверхностей или отсутствии смазки на поверхности фрикционных дисков. Отказы электродвигателей составляют в среднем четвертую часть отказов стрелочных электроприводов.

В стрелочных электродвигателях постоянного тока типа МСП около половины отказов происходит из-за обрывов или замыканий секций обмоток якоря и примерно треть – вследствие неисправности щеточного узла.

Остальные отказы делятся почти поровну между обрывами или замыканиями обмоток статора, а также понижением сопротивления изоляции. Обрывы секций якоря являются следствием нарушения технологии изготовления на заводе. Заметный эффект в повышении надежности щеточного узла дает применение усиленных пружин и контроль их состояния.

Стрелочные трехфазные асинхронные электродвигатели переменного тока типа МСТ более надежны, так как не имеют коллектора со щеточным узлом.

Безотказность светофоров

На сигнальную аппаратуру приходится до 6 % отказов СЖАТ. На падение мачт светофоров приходится до 0,5 % отказов. Долговечность железобетонных мачт и фундаментов определяется действием электрической коррозии, температуры и влаги окружающей среды, действием агрессивной среды (почвы и атмосферы).

Наиболее опасными являются повреждения арматуры и анкерных болтов в подземной части мачт и фундаментов светофоров из-за электрической коррозии, возникающей обычно на участках электрифицированных железных дорог постоянного тока в пределах анодных и знакопеременных потенциалов рельсовой сети при утечках тока с плотностью свыше 0,6 А/мм² с поверхности металла в бетон.

Характерным признаком электрической коррозии арматуры или анкерных болтов являются продольные трещины в подземной части конструкции. Несущая способность конструкции становится меньше нормативной, когда трещины выходят на ее поверхность. Распирающее действие продуктов коррозии может приводить к образованию поперечных трещин в фундаменте мачты на глубине 0,5–0,6 м в месте загиба анкерных болтов.

Разрушение бетона фундаментов и других железобетонных конструкций может происходить от попеременного замораживания и оттаивания воды, проникающей в поры бетона низких марок или при некачественном изготовлении изделий. В наземной части бетон может разрушаться вследствие недостаточной его морозостойкости.

Состояние конструкций должно оцениваться один раз в три года по результатам осмотров наземной и подземной частей. Подземную часть

мачт и фундаментов откапывают до глубины 0,6–0,8 м поочередно с двух боковых сторон с временным закреплением мачт для исключения падения разрушенного электрической коррозией светофора. В первую очередь откапывают конструкцию в анодных зонах с небольшим потенциалом и сопротивлением цепи рельс-светофор меньше 100 Ом.

Ресурс светофорной лампы зависит от скорости испарения вольфрама с нити накала, однородности диаметра вольфрамовой проволоки, постоянства шага спирали нити накала и активности вредных газов внутри колбы лампы. Скорость испарения вольфрама резко возрастает с повышением температуры, меняющейся по длине спирали. Концы спирали охлаждаются массивными электродами, поэтому температура растет к середине спирали. Более высокую температуру имеют участки со сближенными витками и даже с самыми незначительными дефектами. Перед установкой каждую светофорную лампу должны обжигать в течение одного часа номинальным напряжением промышленной частоты. В полученной партии допускается отбраковка 5 % ламп линзовых светофоров и 10 % ламп прожекторных светофоров.

Завышение напряжения питания светофорных ламп сокращает срок службы примерно на 70 %, в то время как снижение напряжения на 5 % от номинального увеличивает срок службы в два раза. Следовательно, правильная регулировка или стабилизация напряжения питания светофорных ламп заметно повышает их надежность.

Безотказность источников электропитания

К источникам электропитания относят трансформаторы, преобразователи, выпрямители, аккумуляторы, щитовые электропитающие установки, на которые приходится до 12 % отказов устройств АБ и до 8 % отказов ЭЦ. При этом параметр потока отказов источников питания ЭЦ может меняться на разных участках $(3,5–38,0) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Наибольшее количество отказов в устройствах электропитания приходится на трансформаторы, выпрямительные элементы, пакетные переключатели, кнопки и другие коммутационные элементы.

Аккумуляторы АБН-72 в устройствах СЖАТ работают в основном в буферном режиме. Изменения напряжения сети переменного тока в таком режиме меняют ток подзаряда аккумулятора, в результате они оказываются либо перезаряженными, отчего начинается разрушение их пластин, либо незаряженными, тогда начинается сульфатация пластин. Износ пластин, ускоренный систематическим перезарядом аккумулятора током большой величины, приводит к выкрашиванию и оползанию активной массы, к коррозии решеток. В результате резко снижается емкость аккумулятора и растет вероятность внутренних коротких замыканий шламом на дне банки.

Разряд аккумулятора большим током может приводить к короблению пластин и внутренним коротким замыканиям. Глубокие разряды батареи,

длительное хранение ее в разряженном состоянии, эксплуатация с пониженным уровнем электролита, высокой плотностью электролита, вредные примеси в электролите, систематические недозаряды вызывают сульфатацию пластин. Безотказность и срок службы аккумуляторов растут при использовании автоматических регуляторов тока типа РТА с батареями на 6 и 7 кислотных аккумуляторов.

Надежность трансформаторов, реакторов и дросселей зависит от режима и условий работы, плотности тока в обмотках, напряжения на них, влажности и температуры окружающей среды. Повышение напряжения на обмотке на 20 % от номинального заметно повышает вероятность пробоя изоляции. Превышение номинального значения тока вызывает перегрев трансформатора, отчего уменьшается электрическая прочность изоляции, повышается вероятность обрывов или коротких замыканий обмоток, деформация или разрушение корпуса.

Снижение рабочей частоты ниже допустимого предела приводит к увеличению тока вследствие снижения реактивного сопротивления обмоток, а увеличение рабочей частоты сопровождается ростом потерь в сердечнике.

Влага может проникать через заливочный материал, впитываться через выводы обмоток и по оплетке проводов. Кроме того, при значительных перепадах температуры большинство органических изоляционных материалов растрескивается и отходит от обложки. В результате создаются зазоры, в которые проникает влага, разрушающая изоляцию. Последний фактор следует учитывать, прежде всего, для трансформаторов, которые устанавливаются в релейных шкафах и путевых коробках.

Интенсивность отказов выпрямительных диодов зависит от нормированной температуры и коэффициента нагрузки, причем увеличение температуры до определенного предела не вызывает увеличения интенсивности отказов. С возрастанием коэффициента нагрузки этот предел сдвигается в область более низких температур.

Для обеспечения надежности выпрямителей, как и других полупроводниковых приборов, не следует превышать установленные пределы по электрическим режимам, а также необходимо создавать нормальный тепловой режим и защищать выпрямители от воздействия влаги.

Безотказность стивов и релейных шкафов

Релейные шкафы и стивы предназначены для установки штепсельных и нештепсельных приборов, блоков ЭЦ, ГАЦ и монтажа схем ЖАТ. Использование штепсельных разъемов позволяет быстро и легко устанавливать и заменять реле или блоки. Однако обрыв цепи в штепсельных разъемах вследствие коррозии гнезд, губок, штырей и ножей – наиболее характерные отказы в релейных шкафах и стивах.

Причинами этих отказов являются вибрация, некачественное обслуживание, вредное влияние окружающей среды (особенно влажности).

Обрывы проводов монтажа происходят обычно в местах некачественной пайки, когда в месте соединения образуются раковины, трещины, сквозные прожоги, наплывы, шлаковые включения, острые выступы. Соединения с такими дефектами должны паяться повторно после удаления старого припоя, а затем закрашиваться цапонлаком. В заводских условиях паяные соединения должны проверяться на разрыв, вибропрочность, коррозионную стойкость, выносливость при кручении и изгибе.

Надежность кабельных и воздушных линий связи

Кабельные линии входят в первую пятерку наименее надежных устройств СЖАТ. Параметр потока отказов кабеля в расчете на 1 км независимо от числа жил находится в среднем в пределах $(1,0-1,6) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ при интенсивности отказов изоляции кабеля порядка $0,15 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ и жил кабеля $0,08 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. На повреждения кабеля приходится 48 % отказов, на понижение сопротивления изоляции 24,7 %, на обрывы жил кабеля 16,8 %, на замыкание жил 8 %, на прочие причины 2,5 %.

Повреждения кабелей происходят из-за стихийных бедствий, попадания тяговых токов и грозовых разрядов, механических воздействий, влияния окружающей среды, нарушения правил производства земляных работ и т. д. При транспортировке кабель подвергается ударам и вибрациям, а при монтаже и прокладке кабель изгибается сначала в кабелеукладчике, а затем при выкладке концов кабеля в форме котлована. Изменения скорости движения и вынужденные остановки кабелеукладчика приводят к появлению усилий, растягивающих или сжимающих кабель. Механические воздействия на кабель оказывают просадки грунта, вибрации на участках с трассой кабеля под дорогами с интенсивным движением. В результате повреждается кабельная оболочка, что способствует ухудшению электрических характеристик кабеля.

Наиболее вредны для кабельных линий изменения температуры и влажности. С изменением температуры меняется сопротивление жил кабеля. При понижении температуры ухудшаются ударная вязкость и прочность на растяжение изоляционных материалов, растрескивается или рвется защитный джутовый покров, пропитанный битумом. Повышается влажность внутри кабеля. Влага способствует разрушению защитных оболочек кабеля. В зимнее время вода, попавшая в мельчайшие трещины, замерзает и, расширяясь, увеличивает трещины. Влага может проникнуть внутрь кабеля через пластмассовые оболочки вследствие диффузии.

Кабели в свинцовой, пластмассовой и поливинилхлоридной оболочке повреждаются грызунами, верхние джутовые покровы бронированных кабелей могут разрушаться грибами, плесенью. Грозные разряды, установ-

ки сильного тока и мощные радиостанции оказывают также влияние на надежность кабельных линий. По мере старения кабеля у поливинилхлоридных оболочек снижаются морозостойкость и изоляционные свойства. Процесс старения ускоряется под влиянием химических сред, высоких температур и напряженности электрического поля, механических воздействий.

К наиболее опасным отказам кабельных и воздушных линий СЖАТ относятся сообщение или заземление отдельных жил. Следствием этого могут быть ложный контроль свободности рельсовой цепи, ложное появление разрешающего сигнала, перевод стрелки под составом и т. д.

Нижний допустимый предел сопротивления изоляции монтажа составляет 1 кОм на 1 В рабочего напряжения, т. е. не допускается ток утечки более 1 мА. Эта норма выбиралась по характеристикам реле типа НР-1-1000, имеющего ток отпускания якоря 2,5 мА. Для реле и других элементов ЖАТ, включаемых через кабельные или воздушные линии, предусматривается двухполюсное отключение, поэтому опасным является наличие заземления или плохой изоляции как минимум в двух местах. Однако гарантированное предотвращение появления опасных обходных путей для сигнального тока требует немедленного устранения ухудшения изоляции жил или проводов линейных цепей.

На воздушные линии приходится относительно небольшое количество отказов СЖАТ, однако это определяется их небольшой протяженностью в данных системах. Безотказность воздушных линий примерно в два раза ниже, чем кабельных. Это объясняется их большей подверженности вредным климатическим условиям и электрическим воздействиям, меньшей защищенностью от механических воздействий. Наиболее характерными отказами в воздушных линиях ЖАТ являются обрыв проводов (до 60 %), закорачивание проводов при их сплетении или набросах токопроводящих предметов (до 25 %), снижение сопротивления изоляции на «землю» (до 5 %) и между проводами (до 10 %).

Надежность микроэлектронных и микропроцессорных устройств

Основными компонентами всей микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры являются интегральные микросхемы и радиоэлементы – резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, транзисторы, диоды.

В микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуре СЖАТ основной вклад в суммарную интенсивность отказов вносят интегральные схемы. В блоках и модулях микропроцессорных систем на микросхемы с их пайкой приходится от 80 % до 97 % от общей интенсивности отказов. На отказы резисторов приходится до 8 %, на отказы конденсаторов – до 4 %, на отказы трансформаторов, катушек индуктивностей – до 2 % от общей интенсивности отказов блока или модуля. Следовательно, на эти элементы

вместе с микросхемами и полупроводниковыми приборами приходится до 95 ... 99,9 % от рассматриваемой общей интенсивности отказов.

Отказы микросхем можно разделить на три группы: отказы, обусловленные физико-химическими процессами, протекающими в объеме кристалла полупроводника; отказы, связанные с процессами на поверхности полупроводника; отказы, связанные состоянием контактных соединений.

Первая группа отказов связана в основном со структурными дефектами объема кристалла полупроводника (микротрещинами и др.). Дефекты структуры, развиваясь в процессе эксплуатации под воздействием температуры и механических нагрузок, существенно изменяют электрические характеристики микросхем, приводя к постепенным и внезапным отказам.

Вторая группа отказов связана с накоплением на защитном слое двуокиси кремния полупроводника, а в объеме, близком к поверхности, – зарядов, вызывающих значительные изменения в состоянии $p - n$ переходов и появление поверхностных каналов с инверсной проводимостью. В результате возрастают токи утечки, происходит шунтирование токопроводящих дорожек, ухудшаются электрические характеристики элементов структуры микросхемы (коэффициенты усиления, уровни шумов и т. д.).

Третья группа связана с использованием в ИМС двух типов соединений: металлизированную разводку между отдельными элементами и соединение алюминиевых контактных площадок с внешними выводами с помощью золотых проводников, привариваемых к контактным площадкам на кристалле полупроводника и к выводам на корпусе. Отказы этой группы связаны именно с нарушением этих контактов и металлизированной разводки из-за механических повреждений или недостаточной толщины пленки алюминия. В результате происходит локальный перегрев дорожек, который может привести к внезапному отказу – перегоранию соединения.

Нарушение целостности электрической цепи и появление отказа может произойти и из-за образования диэлектрической пленки на границе раздела алюминий – кремний или гидрата окиси алюминия на металлизированной разводке при попадании влаги внутрь корпуса ИМС. Соединение металлизированных площадок с внешними выводами корпуса ИМС осуществляется с помощью золотой проволоки, которая с помощью термокомпрессионной сварки присоединяется к контактным площадкам. Основными причинами отказов термокомпрессионных контактов являются: образование пленок с высоким сопротивлением на границе раздела алюминий – золото, отрыв алюминиевых контактных площадок от поверхности полупроводника, а также малая механическая прочность самих термокомпрессионных контактов.

Микроэлектронные элементы и различные компоненты микропроцессорной техники монтируются на печатных платах. Они могут быть однослойными, пространственными и многослойными. В качестве диэлектрика наиболее распространен гетинакс или текстолит. На него наклеивается

медная фольга, из которой впоследствии формируются контактные дорожки.

Наиболее часто к отказам микропроцессорных систем приводят следующие дефекты печатных плат: отслоение, обрывы, микротрещины токопроводящих дорожек, снижение сопротивления изоляции подложки, замыкание токопроводящих элементов, электрохимическая коррозия в местах пайки, поверхностное загрязнение. Пыль на элементах создает условия для повышенного увлажнения, снижает сопротивление изоляции, способствует возникновению на элементах опасных электростатических разрядов и полей высокого напряжения.

Резисторы – наиболее массовые элементы и составляют до 40–45 % всех элементов систем автоматики. Вследствие этого их надежность в значительной степени определяет надежность аппаратуры в целом.

У резисторов более 55 % отказов происходит из-за обрывов в токопроводящей цепи и нарушений контактов, 35–40 % вследствие перегорания проводящего материала (внезапные отказы), 5–10 % за счет дрейфа сопротивления проводящего материала (постепенные отказы). При этом до 25 % отказов резисторов являются зависимыми, то есть вызываются короткими замыканиями, пробоями конденсаторов и т. д.

На надежность резисторов влияют физико-химические процессы – термическое окисление резистивного слоя, изменение его структуры, обугливание защитного покрытия, механические вибрации и удары, влажность и давление воздуха. Впаянный резистор можно рассматривать как некоторую массу, установленную на упругих элементах сложной формы. Если собственная резонансная частота такой системы совпадет с частотой вибрации, то возникает резонанс колебаний, приводящий к разрушению резистора или узлов пайки (резонансная частота лежит в диапазоне 100–900 Гц).

Конденсаторы, как и резисторы, составляют большую часть элементов схем. У конденсаторов деградиационные процессы вызывают появление как внезапных, так и постепенных (параметрических) отказов.

Основными причинами отказов конденсаторов являются пробой диэлектрика – примерно 80 % от всех отказов, на механические повреждения приходится около 8 %, снижение величины емкости вследствие потери электролита – 8 %, снижение величины сопротивления изоляции (токи утечки) – до 5 %.

В процессе эксплуатации электролитических конденсаторов частой причиной отказов является кратковременная подача напряжения обратной полярности.

Катушки индуктивности применяются в качестве дросселей, катушек связи, фильтров, резонансных контуров. Внезапные отказы катушек индуктивности обусловлены обрывами и короткими замыканиями между витками обмотки. Постепенные отказы обусловлены необратимыми изме-

нениями индуктивности и добротности. На надежность катушек индуктивности наиболее сильно влияет температура. В результате теплового воздействия возможны обрывы провода обмотки из-за разного температурного коэффициента линейного расширения каркаса и самого провода, короткое замыкание витков из-за теплового разрушения изоляции.

В трансформаторах отказы происходят из-за пробоя изоляции на корпус или между обмотками, обрыва проводников в обмотке, замыкания между витками обмотки, нарушения контактов и соединений, недопустимого снижения сопротивления изоляции вследствие ее старения или чрезмерного увлажнения, нарушения межлистовой изоляции магнитопроводов.

Межвитковое короткое замыкание обмотки приводит к чрезмерному нагреву трансформатора. Нарушение межлистовой изоляции сердечников магнитопровода приводит к недопустимому повышению температуры отдельных участков магнитопровода и всего магнитопровода в целом, повышенному нагреву обмоток, выгоранию части магнитопровода (пожар в стали).

Транзисторы и диоды относятся большой группе полупроводниковых приборов (ПП). У рассматриваемых приборов практически одинаково проявляются постепенные и внезапные отказы. У ПП внезапные отказы составляют до 20 % числа всех отказов. Они обусловлены: пробоем $p - n$ переходов, обрывами и перегревом выводов, наружным пробоем между выводами, коротким замыканием в структуре полупроводника, растрескиванием кристалла и др.

Неправильным выбором типов и эксплуатационных режимов обусловлено до 70 % всех отказов ПП. Интенсивность внезапных отказов ПП практически не зависит от времени работы полупроводника. Но и для ПП существует период старения, в результате при длительной эксплуатации повышается вероятность постепенных отказов. Постепенные отказы составляют до 80 % всех отказов. Они вызываются возрастанием обратных токов переходов, снижением коэффициентов передачи, дрейфом параметров и характеристик, возрастанием уровня собственных шумов.

Увеличение запирающих напряжений на $p - n$ переходах ПП увеличивает вероятность электрического пробоя в объеме кристалла и на его поверхности. Из-за наличия неоднородностей в кристалле полупроводника могут возникать локальные пробой по неоднородностям, которые приводят к общему пробоею перехода. Величина напряжения пробоя снижается в результате старения полупроводника. Максимальное значение тока в ПП определяется допустимой температурой перехода. Повышение плотности тока в малом объеме приводит к локальным перегревам и отказу ПП в результате теплового пробоя перехода.

Неоднородности в материале внутренних выводов ПП вызывает появление в них участков с повышенным сопротивлением. Поэтому даже при

токах, меньших максимально допустимых, возможно перегорание выводов.

При возрастании обратного напряжения на переходе мощность, рассеиваемая в нем, увеличивается. Это приводит к увеличению температуры прибора, увеличению токов через переход, что опять приводит к увеличению температуры и, в конечном итоге, к тепловому пробое. При тепловом пробое возникает короткое замыкание в результате разрушения структуры полупроводника.

Постепенные отказы полупроводников вызываются обратимыми изменениями параметров из-за повышения температуры и необратимыми изменениями вследствие старения. Старение полупроводника происходит из-за физико-химических процессов как в объеме кристалла, так и на его поверхности. Указанные процессы сильно зависят от физических воздействий и химической природы окружающей среды, от концентрации и характера примесей, неоднородностей и дефектов структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Острейковский В.А.* Теория надежности : учеб. для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высш. шк., 2003. – С. 463.
2. *Ушаков И.А.* Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем. – М. : Энергоатомиздат, 1991.
3. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1989.
4. *Голинкевич Т.А.* Прикладная теория надежности : учеб. для вузов / Т.А. Голинкевич. – М.: Высш. шк., 1985. – С. 168.
5. *Глазунов Л.П.* и др. Основы теории надежности автоматических систем управления : учеб. пособие для вузов / Л.П. Глазунов, В.П. Грабовецкий, О.В. Щербаков. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – С. 208.
6. *Половко А.М., Гуров С.В.* Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – С.704.
7. Сборник задач по теории надежности / под ред. А.М. Половко, И.М. Маликова. – М. : Сов. Радио, 1972. – С. 408.
8. *Никулин С.М.* Надежность элементов радиоэлектронной аппаратуры. – М. : Энергия, 1979. – С. 80.
9. Надежность технических систем : справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – С. 608.
10. *Волков Н.Г.* Надежность функционирования систем электроснабжения : учеб. пособие. – Томск : Издательство ТПУ, 2005. – С. 157.
11. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Статистические данные, экспертные оценки и нормы безопасности / В.В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д.В. Гавзов, Р.Ш. Ягудин, Т.А. Чугуй // Автоматика, телемеханика и связь. – 1993. – № 10. – С. 17–19.
12. *Брейдо А.И., Овсянников В.А.* Организация обслуживания железнодорожных устройств автоматики и связи. – М. : Транспорт, 1983. – 208 с.
13. *Майерс Г.* Надежность программного обеспечения. – М. : Мир, 1980. – 360 с.
14. *Меньшиков Н.Я., Королев А.И., Ягудин Р.Ш.* Надежность железнодорожных систем автоматики и телемеханики. – М. : Транспорт, 1976. – С. 215.
15. *Шаманов В.И.* Надежность систем железнодорожной автоматики и телемеханики. – Иркутск : ИрИИТ, 1999. – С. 78.
16. *Ягудин Р.Ш.* Надежность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. – М. : Транспорт, 1989. – С. 150.
17. *Горелик А.В., Ермакова О.П.* Практикум по основам теории надежности : учеб. пособие. ОАО «РЖД» / Д.В. Шалягин, А.В. Горелик, О.П. Ермакова. – М. : ФГБОУ УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. – С. 133.

18. *Ушаков И.А.* Курс теории надежности систем : учеб. пособие для вузов / И.А. Ушаков. – М. : Дрофа, 2008. – С. 239.

19. *Сапожников В.В., Сапожников Вл. В., Шаманов В.И.* Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. – М. : Маршрут, 2003.

20. *Ефимов А.В., Галкин А.Г.* Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог. – М. : УМК МПС России, 2000.

Учебное издание

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Конспект лекций

Редактор *М.Н. Щербакова*
Компьютерный набор *В.А. Целищев*

Подписано в печать 27.10.2015.

Уч.-изд. л. 10,15. План 2015 г.