

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**Санкт-Петербургский государственный технологический  
университет растительных полимеров**

---

**А.К. ХМЕЛЬНИЦКИЙ, В.В. ПОЖИТКОВ  
Г.А. КОНДРАШКОВА**

**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**  
**Часть 1**

**Учебное пособие**

Санкт-Петербург  
2005

62-5(075)

Х-654

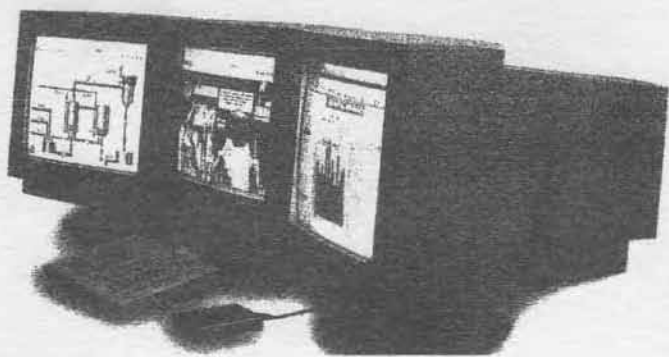
А.К. ХМЕЛЬНИЦКИЙ, В.В. ПОЖИТКОВ

Г.А. КОНДРАШКОВА

**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

**Часть 1**



**Санкт - Петербург**

**2005**

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

Санкт-Петербургский государственный технологический  
университет растительных полимеров

---

А.К. Хмельницкий, В.В. Пожитков, Г.А. Кондрашкова

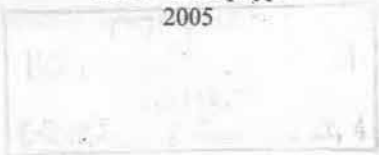
**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Часть 1

794587

Санкт - Петербург  
2005



ББК 32.965 я 7  
Х 657  
УДК 519.24 (075)

ХМЕЛЬНИЦКИЙ А. К., ПОЖИТКОВ В. В., КОНДРАШКОВА Г. А.

Диагностика и надежность автоматизированных систем: Учебное пособие / ГОУВПО СПбГТУ РП. СПб, 2005. Часть 1. 61 с.: ил. 11.

Настоящая часть учебного пособия предназначена для студентов специальности «Автоматизация технологических процессов и производств» всех форм обучения по дисциплине «Диагностика и надежность автоматизированных систем» и посвящена понятиям и определениям критериев надежности.

Рецензенты: профессор Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), доктор технических наук Русинов Л. А.; профессор Санкт-Петербургской академии холода и пищевых технологий, доктор технических наук Боллобаш В. А.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

Редактор и корректор Т. А. Смирнова  
Техн. редактор Л. Я. Титова

Темплан 2005 г., поз. 63

Подп. к печати 27.05.05. Формат бумаги 60 x 84/16. Бумага типа №1,  
Печать офсетная. Печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 100 экз.  
Изд. №63. Цена «С» 63. Заказ 874

Ризограф ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4

© ГОУВПО Санкт-Петербургский  
государственный технологический  
университет растительных полимеров,  
2005

© Хмельницкий Артур Константинович  
Пожитков Владимир Васильевич  
Кондрашкова Галина Анатольевна, 2005

## ВВЕДЕНИЕ

Теория надежности – наука молодая, возникла в 30-х годах прошлого века для нужд радиоэлектроники и военной техники. Однако математическим аппаратом ее является теория вероятностей, основные понятия которой зародились в XVI – XVII веках. Это объясняется тем, что в теории надежности имеют место изучения случайных событий, поэтому численное определение ее показателей осуществляется методами теории вероятностей и математической статистики.

Классические исследования в этой области связаны с именами выдающихся ученых: Бернулли (1654 – 1705), Муавра (1667 – 1754), Лапласа (1749 – 1824), Пуассона (1781 – 1840), Пирсона (1857 – 1936) и др.

К числу отечественных ученых, внесших весомый вклад в развитие теории вероятностей, следует отнести П. Л. Чебышева (1821 – 1894) и его учеников А. А. Маркова, П. Л. Колмогорова, Б. В. Гнезденко, А. М. Половко и др.

### Раздел 1. ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ

#### Глава 1. Понятие надежности и ее особенности

##### 1.1. Теория надежности

*Теория надежности* – научная дисциплина, изучающая общие закономерности, которых следует придерживаться при проектировании, испытаниях, изготовлении, приемке и эксплуатации систем для получения максимальной эффективности их использования. В свою очередь эксплуатацию системы составляет совокупность различных фаз существования ее, начиная с транспортировки, хранения и кончая подготовкой к использованию по назначению, собственно использованием, а также техническим обслуживанием и ремонтами. Наконец,

эффективность использования есть мера выполнения системой определенных функций при определенных условиях окружающей среды. Таким образом, теория надежности охватывает весьма широкий круг вопросов, связанных с решением большинства технических задач, - от их постановки, т.е. разработки условий и требований, предъявляемых к проектируемым системам, до построения этих систем, организации их эксплуатационного обслуживания.

Теория надежности есть наука, изучающая закономерности возникновения отказов технических устройств.

Отказы относятся к малоизученным явлениям. Это объясняется, прежде всего, тем, что время возникновения отказа зависит от большого числа случайных факторов, его трудно исследовать и еще труднее измерить.

Время возникновения отказа или время работы системы между отказами представляют собой явления случайные. Наблюдая за внешними проявлениями отказов, можно видеть, что они приводят к различным последствиям - полное прекращение работы системы, ухудшение ее характеристик, временное прекращение работы с последующим восстановлением (сбой) и т.п. Эти состояния системы аналогичны смерти, болезни или временной потере работоспособности живого организма.

Случайность времени отказов связана со случайными изменениями: условий эксплуатации (нестабильность питающего напряжения; вариации климатических условий; различие в квалификации обслуживающего персонала), технологического процесса (различные качества материалов, усталость обслуживающего персонала), условий транспортировки и т. п.

Отказавшая система обычно восстанавливается, так как ее отказы могут возникнуть из-за отказов элементов различного типа,

расположенных в различных местах сложной системы, время восстановления также является случайной величиной.

При изучении закономерностей отказов наибольший интерес представляет изучение места возникновения отказов и в особенности промежутков времени восстановления и работы системы между отказами.

*Следует при этом иметь в виду, что теория надежности является самостоятельной наукой, а не отдельным разделом теории вероятностей. Она является технической, а не математической дисциплиной, а круг решаемых ею задач не ограничивается задачами теории вероятностей.*

Теория надежности возникла из потребностей практики в связи с бурным техническим прогрессом и в первую очередь в связи с появлением сложных автоматических систем с большим числом элементов электроники и автоматики.

Теория надежности изучает:

- критерии и количественные характеристики надежности;
- методы анализа надежности;
- методы повышения надежности;
- методы синтеза сложных систем по критериям надежности;
- методы испытания системы на надежность;
- научные методы эксплуатации системы с учетом ее надежности.

С точки зрения теории надежности, все современные автоматизированные системы управления можно разделить на два класса: системы малого масштаба и системы большого масштаба.

*Системы малого масштаба* предназначены для управления локальными объектами и процессами. Они обычно обладают малым количеством подсистем и простыми связями между ними.

*Системы большого масштаба* образуются из блоков подсистем и локальных объектов, управление которыми осуществляется с помощью иерархической структуры. В системы большого масштаба могут быть объединены территориально - разобщенные объекты. В системах управления возможна работа человека-оператора.

Исходные данные, которыми располагает проектировщик системы управления, весьма ограничены. Обычно это результаты кратковременных испытаний новых узлов в лабораторных условиях, а также статистические данные о надежности подобных устройств в условии эксплуатации (рис. 1), которые часто отличаются от тех, для которых предназначается разрабатываемая система.



Рис. 1. Общая схема эксплуатации системы

Несмотря на это, расчеты надежности следует начинать на самых ранних этапах разработки новых систем и средств автоматизации, начиная с этапа планирования и разработки технического задания. Это значительно уменьшает стоимость новых систем и средств автоматизации. Таким образом, исследования по теории надежности должны быть подчинены одной цели – разработке действенных методов повышения и сохранения надежности при проектировании, изготовлении и эксплуатации.



## *1.2. Надежность*

*Надежность* – есть свойство системы сохранять свои выходные характеристики (параметры) в определенных пределах при данных условиях эксплуатации за определенное время.

Из этого определения следует, что надежность есть внутреннее, объективное свойство системы, присущее каждому данному ее образцу.

Определению надежности может удовлетворять только качественное определение. Надежность является основным параметром качества системы. Качество системы есть совокупность свойств, определяющих степень пригодности ее для практического применения в соответствии с назначением.

Из определения надежности также следует, что ненадежной считается не только та система, у которой наступает механическое или электрическое повреждение, приводящее к неработоспособности системы, но также и та, у которой выходные характеристики выходят за допускаемые пределы. Этими характеристиками могут быть точность, качество переходного процесса, вид частотной характеристики и т.д.

Надежность тесно связана с различными сторонами эксплуатации систем. Ее можно определить, как способность системы не выходить из строя и выполнять в полном объеме свои функции. Т.е. хорошо спроектированная и качественно изготовленная, детально прошедшая испытания до начала эксплуатации и правильно эксплуатируемая система в течение всего времени эксплуатации должна работать без каких - либо остановок, кроме предусмотренных в плановом порядке или вызванных организационными факторами.

Под надежностью также можно понимать и совокупность свойств системы, обеспечивающих сохранение ее параметров в установленных пределах.

Надежность – важнейший технический параметр системы, ее количественные характеристики обязательно указывают в техническом задании на ее разработку.

Важным параметром системы является и ее *живучесть* – это надежность системы в экстремальных условиях (взрыв, пожар, затопление) [3].

Свойство живучести проявляется в реакции системы на появление нарушений, тогда как свойство безотказности проявляется в процессе функционирования в нормальных условиях.

При рассмотрении живучести не делается никаких предположений о причинах появления нарушений. Это могут быть природные явления, ошибки людей и т.д.

Поскольку при рассмотрении живучести речь идет о динамике изменения функционирования системы после появления нарушения, удобно различать статическую и динамическую живучесть.

При рассмотрении *статической живучести* не учитываются переходные процессы, происходящие в системе при появлении нарушений, основное внимание обращается на возможность функционирования системы при наличии нарушений.

При рассмотрении *динамической живучести* основное внимание обращается на динамику изменения функционирования системы после появления нарушений.

Возможны детерминистский и вероятностный подходы к оценке живучести системы. При *детерминистском подходе* предполагается однозначная реакция системы на появление определенных нарушений. *Вероятностный подход* учитывает, что отдельные элементы системы имеют различную уязвимость и заранее неизвестно место появления нарушения в системе [4].

Особое положение надежности среди показателей качества (рис. 2) объясняется тем, что она связана с такими важными факторами как автоматизация процессов, экономия энергоресурсов, а также надежность в отличие от других показателей качества трудно оценивать: ее невозможно быстро заметить и сопоставить с требованиями нормативно-технической документации [7].



Рис. 2. Показатели качества системы

### *1.3. Проблемы надежности*

Прогресс современной техники, расширение круга задач, возложенных на системы управления, высокие требования к точности, помехозащищенности, быстрдействию привели к усложнению систем,

предназначенных для выполнения комплекса задач. Но усложнение системы резко снижает надежность современного управления.

Ненадежность не только резко снижает эффективность использования системы, но и приводит к огромным экономическим потерям, неоправданному повышению стоимости эксплуатации. Усложнение аппаратуры резко снижает надежность современного радиоэлектронного оборудования. Низкая надежность приводит к тому, что стоимость эксплуатации такого оборудования в течение одного года превышает в несколько раз стоимость самого оборудования, что приводит к огромным экономическим потерям и резко снижает эффективность использования системы.

Возникновение проблем надежности обусловлено, главным образом, следующими причинами: повышением ответственности функций, выполняемых аппаратурой – так называемой ценой отказа; ростом сложности аппаратуры; отставанием качества элементов от их количественного применения.

Рассмотрим одну из основных проблем надежности, связанную с усложнением технических объектов. Тенденция функционально-структурного усложнения технических объектов (переходом к качественно новым методам, обеспечивающим повышение производительности, быстродействие, точность и улучшающие другие свойства). Объективной «платой» за качественное совершенствование является возрастание структурной сложности. Практика проектирования показывает, что темпы роста сложности технических систем находятся в противоречии с требованиями по их безотказной работе даже в случае применения самой современной элементной базы. Дело не только в увеличении количества компонентов, сложность систем повышается за счет развития многофункциональности и объединения традиционных методов и техники

с методами и техникой вычислительных комплексов, на которые возлагаются функции обработки и анализа данных для принятия решений по изменению режимов работы системы в целом. Решение задач эффективного управления качеством систем возможно на основе методов теории надежности.

Вторая проблема связана с необходимостью предварительного учета влияния на систему при ее эксплуатации различных факторов объективного характера, параметры которых могут меняться в значительных диапазонах. Возникает задача изучения, нормирования и выработки рекомендаций по нейтрализации их воздействий.

Третья проблема связана с ростом количества элементов, используемых в системе. Этот рост требует повышения их качества. Исследования в этом направлении дали следующий результат – увеличение надежности элементов резко отстает от роста сложности системы.

Четвертая проблема – ответственность функций, выполняемых системой. В связи с комплексной автоматизацией производственных процессов на управляющие устройства возлагаются исключительно ответственные задачи, которые должны решаться безотказно в течение всего периода работы системы.

Выполнение системой своих функций в значительной мере зависит от полного или частичного исключения из процесса управления человека-оператора. Исключение оператора вызвано либо скоротечностью процессов, связанных с работой системы, либо ограниченностью физических возможностей человека участвовать в протекающих процессах (например, агрессивная среда в химических процессах).

- Трудность обеспечения высокой надежности современной системы вызвано также сложностью условий, в которых она эксплуатируется.

Вопросы надежности системы являются весьма важной экономической проблемой. Эксплуатация сложного и ненадежного оборудования требует больших материальных затрат на содержание высококвалифицированного обслуживающего персонала, на профилактические осмотры и ремонт.

*Очевидно, что чем сложнее система, тем труднее обеспечить эксплуатационное обслуживание, тем больше система подвержена расстройке и разрегулировке, тем вероятнее ее выход из строя.*

#### **1.4. Повышение надежности**

Большое влияние на надежность элементов и систем оказывают конструктивно-производственные факторы и мероприятия, действующие на стадиях проектирования и изготовления системы.

*На стадии проектирования повышение надежности обеспечивается:*

- выбором схемы;
- выбором элементов и режимов их работы;
- выбором конструктивного решения системы;
- учетом психофизических возможностей операторов;
- удобством технического обслуживания и восстановления;
- учетом недостатков проектирования, выявленных при испытаниях.

*Процесс проектирования предопределяет величину надежности системы. Однако реализация этой величины в значительной степени связана с организацией производства.*

*Мероприятия, связанные с обеспечением надежности в процессе производства, можно свести в следующие группы:*

- *строгое соблюдение и совершенствование технологии производства;*
- *автоматизация производства;*
- *тренировка элементов и систем;*
- *настройка и налаживание систем;*
- *текущий и выходной контроль.*

Рассмотрим основные способы повышения надежности.

1) Наиболее рациональными способами повышения надежности на стадии проектирования является ***резервирование и использование систем встроенного автоматического контроля***, предназначенных для сокращения времени устранения неисправностей и прогнозирования отказов, а также для автоматического включения резервных элементов. Однако при выборе схем всегда следует учитывать, что резервирование и применение систем автоматического контроля сопряжено с увеличением веса, габаритов, объема и стоимости системы.

2) ***Выбор наиболее надежных элементов.*** Выбор того или иного типа элемента должен быть связан с анализом технических требований к надежности. Может оказаться, что предъявляемые требования таковы, что при данном числе элементов и при данных условиях работы системы удовлетворить их можно, выбирая не самые надежные элементы.

3) ***Облегчение режимов работы элементов.*** Улучшить условия работы элементов можно, во-первых, уменьшая вредное влияние окружающей среды и внешних воздействий и, во-вторых, облегчая электрические режимы работы. Уменьшить вредное влияние окружающей среды и вредных воздействий можно, создавая искусственный климат и демпфируя систему. Облегчить электрические режимы работы элементов можно понижением коэффициентов нагрузки и уменьшением температуры окружающей среды [8].

4) *Создание систем с ограниченными последствиями отказов элементов.* Отказы элементов сложной системы не равноценны. Одни отказы приводят к потере работоспособности, другие лишь ухудшают характеристики системы, третьи нарушают контроль человека за работой системы и т.д.

5) *Стандартизация и унификация элементов.* Унифицированные и стандартизованные системы всегда более надежны. Это объясняется тем, что такие системы, как правило, доведены до совершенства на основании богатого опыта эксплуатации.

6) *«Тренировка» и отбраковка элементов с внутренними дефектами.* «Тренировкой» элементов достигается сокращение этапа приработки, характеризующегося повышением интенсивностью отказов. Элементы с внутренними дефектами часто отбраковывают при тяжелых условиях работы. Время и режимы «тренировки» должны выбираться таким образом, чтобы полностью удалить слабые элементы и вместе с тем не ухудшать качества нормальных элементов.

7) *Организация текущего и выходного контроля.* Текущий контроль обычно производится на различных стадиях сборки и наладки системы. Качество этого контроля оказывает существенное влияние на надежность системы. Методика текущего (промежуточного) контроля разрабатывается применительно к конкретным образцам системы. Обычно предусматриваются контрольные операции после окончания монтажа, после настройки и налаживания отдельных узлов системы.

8) *Выходной контроль элементов, поступающих со смежных предприятий.* При их производстве могут быть допущены отклонения от заданной технологии производства, а, следовательно, отклонения характеристик от номинальных значений.



9) *Правильный выбор изоляционных материалов.* Они должны выдерживать механические и электрические нагрузки во всех диапазонах эксплуатационных условий. При выборе материалов необходимо учитывать как конструктивные, так и производственно-экономические факторы. Используемые материалы должны иметь такую скорость старения, при которой будет обеспечен необходимый технический ресурс системы и необходимый срок ее хранения.

10) *Удобство технического обслуживания и восстановления.* Важным эксплуатационным требованием к системе является удобство технического обслуживания и восстановления. Поэтому при конструировании должны предусматриваться:

- встроенные датчики, позволяющие проверять параметры системы;
- комплекс удобной, легкой и достаточно точной измерительной аппаратуры;
- лёгкий и свободный доступ к элементам системы, исключающий повреждение других элементов при замене отказавших;
- простота операций при настройке и регулировке системы.

11) *Испытания опытных образцов.* Целью испытаний опытных образцов является выявление слабых с точки зрения надежности элементов системы, недостаточная надежность которых обусловлена ошибками проектирования.

## Глава 2. Определение основных критериев систем управления

### 2.1. Отказ

*Отказ* - это событие, после появления которого, выходные характеристики системы выходят за допустимые пределы. Отказ - частичная или полная утрата свойств, которая существенным образом

снижает или приводит к полной потере работоспособности системы. В то же время *механизмом отказа* – является совокупность физических и (или) химических процессов, приводящих к возникновению отказа.

Из этого определения следует, что отказ может наступать не только при механических или электрических повреждениях элементов (обрывы, короткие замыкания), но и при нарушении регулировки, из-за ухода параметров элементов за допустимые пределы и т.п.

Формулировка отказа для конкретного технического объекта является в известной мере одной из субъективных и важнейших задач при расчете надежности.

*Критерий отказа* – признак или совокупность признаков работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и (или) конструкторской документации. В основу классификации отказов может быть положено ряд признаков. *Признак отказа* – это изменение объекта, обусловленное возникновением отказа и оказывающее непосредственное или косвенное воздействие на органы чувств наблюдателя [3]. Наряду с различными видами отказов существуют и *модели отказов* – т.е. математическое описание физических или химических процессов, составляющих механизм отказа. Часто в надежности встречается понятие «*производственный отказ*», оно означает – отказ, возникший в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта, выполнявшегося на ремонтном предприятии [3].

В табл. 1 представлена классификация отказов.

## Классификация отказов

№	Классификационные признаки	Виды отказов
1	По возможности прогнозирования места возникновения	Закономерные Случайные
2	По взаимосвязи между собой	Независимые Зависимые
3	По характеру процесса возникновения	Внезапные Постепенные
4	По времени существования	Окончательные Временные Перебегающие
5	По причинам возникновения	Конструктивные Технологические Эксплуатационные
6	По физическим признакам	Обрыв Перегрузка Уход параметров за пределы установленных норм ТУ
7	По объему и характеру восстановления	Расстройки Повреждения Аварии

Моменты возникновения отказов в сложной системе обычно являются событиями случайными. Однако место их возникновения удается иногда предсказать заранее. Это возможно в тех случаях, когда систематически наступает механический или электрический износ одного и того же элемента (или узла) во многих однотипных системах. Подобные отказы иногда называют *закономерными* в противоположность отказам *случайным*, место и моменты возникновения которых заранее предсказать затруднительно.

*Систематические отказы* одних и тех же элементов наиболее часто наблюдаются в начале эксплуатации первых образцов системы и возникают вследствие конструктивных или технологических ошибок. В

дальнейшем аппарата усовершенствуется и подобные отказы не возникают.

Отказы как случайные события, могут быть *независимыми* и *зависимыми*. Если отказ какого – либо элемента в системе не приводит к отказу других элементов, то такой отказ называется *независимым*. Отказ, появившийся в результате отказа других элементов, называется *зависимым*.

В большинстве случаев механические или электрические повреждения элементов наступают мгновенно, внезапно и приводят к потере работоспособности либо самого элемента, либо всей аппаратуры. Такие отказы называют мгновенными или *внезапными*. Длительное постепенное изменение параметров элементов по причине старения материалов в большинстве случаев приводит лишь к ухудшению выходных характеристик аппаратуры при сохранении ее работоспособности. Такие отказы называют *постепенными*.

Отказы бывают также *окончательные*, *временные* и *перемежающиеся*.

При *окончательном отказе* аппарата либо становится неработоспособной, либо ее характеристики выходят за допустимые пределы на все время, пока не будет устранен отказ.

*Временные отказы* могут самопроизвольно исчезать без вмешательства обслуживающего персонала после устранения вызвавшей их причины.

*Перемежающийся отказ* продолжается короткое время, затем система самовосстанавливается и работает надежно.

По причинам возникновения отказов можно выделить: конструктивные, технологические и эксплуатационные.

*Конструктивные* – возникающие в результате несовершенства правил и норм конструирования.

*Технологические* – возникающие в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта, выполненного на ремонтном предприятии.

*Эксплуатационные* – возникающие в результате нарушения правил или условий эксплуатации.

По физическим признакам проявления различают отказы типа: *обрыв, перегрузка, уход параметров за пределы установленных норм ТУ*. Первые два вида отказов приводят, как правило, к полному прекращению функционирования системы, причем перегрузки могут вызывать цепь негативных последствий, изменение параметров определяет состояние скрытой неработоспособности, что приводит в конечном итоге к срыву решаемой задачи.

Расстройки, повреждения и аварии отличаются друг от друга объемом и характером ремонта.

*Расстройкой* называется нарушение нормального режима работы из-за неправильной установки органов регулировки при полностью исправных элементах системы; для их устранения достаточно лишь произвести подстройку.

К *повреждениям* относятся отказы, вызванные необратимыми изменениями параметров элементов, для устранения которых требуется заменить неисправные элементы.

К *аварийным* относятся отказы, для устранения которых требуется длительное время; они обычно происходят либо вследствие грубых

нарушений правил технической эксплуатации, либо из-за производственных недостатков системы.

Отказы приводят к большим материальным затратам и снижению экономической эффективности аппаратуры. Расходы на техническое обслуживание и ремонт могут составлять до 50 % суммарного объема вложений в изготовление аппаратуры.

На рис. 3 представлена диаграмма распределения отказов.



Рис. 3. Диаграмма распределения отказов

В табл. 2 представлены основные причины отказа на различных стадиях жизненного цикла системы. Конечно, данные, приведенные в табл. 2, являются ориентировочными и не могут отображать статистические связи в любых системах.

Таблица 2

Причины отказов системы

Этапы	Причины отказов	Число отказов, %
Проектирование	<b>Схемные</b>	
	1. Недостатки схемы	11
	2. Неправильный выбор электрических величин	10
	3. Неправильное применение элементов	12

Этапы	Причины отказов	Число отказов, %
	<b>Конструктивные</b>	
	1. Неправильный выбор материала	5
	2. Неправильная механическая конструкция	5
Производство	1. Изготовление не в соответствии с техническими условиями	18
	2. Недоброкачественное сырье и полуфабрикаты	2
Эксплуатация	1. Климатические условия и механические нагрузки, не соответствующие, заданным	12
	2. Неправильное обслуживание и неправильный режим эксплуатации	18
Причины, которые могут быть отнесены к любому из предыдущих этапов	Износ, старение и т.д.	7

Сбор сведений об отказах объектов может проводиться либо персоналом, непосредственно занимающимся техническим обслуживанием, либо представителями службы надежности. В последнем случае достоверность и полнота информации повышаются. В любом случае необходимы мероприятия по проверке заполнения первичных документов и стимулированию правильности записей в них.

Основными первичными документами об отказах объектов являются журналы, формуляры и карточки отказов. При большом числе элементов в системе, находящихся под наблюдением, удобно вести журнал. Преимущество журналов состоит в их компактности, простоте регулярного контроля и привычности для эксплуатационного персонала.

Формуляры ведутся на каждый технический объект и поэтому содержат информацию об объекте с начала его эксплуатации (сведения об отказах, восстановлениях, профилактике, доработке и т.п.).

Карточки отказов, представляющие собой бланки с вопросами, на которые надо дать ответ, заполняются при каждом отказе объекта. В карточки отказов вносятся следующие сведения:

- номер карточки;
- тип и серийный номер системы;
- длительность работы до появления отказа;
- условия работы (испытания) при которых появился отказ;
- внешние признаки неисправности (отказа);
- местоположение, тип и серийный номер отказавшего элемента;
- вероятная причина появления отказа;
- требуемый ремонт;
- трудозатраты на ремонт;
- дата и подписи лица, заполнявшего карточку, и начальника, проверившего правильность сведений.

Кроме этих сведений на карточках отказов записывается и другая информация, характерная для исследуемой системы.

Сбор сведений об отказах является весьма ответственным этапом исследования надежности элементов и систем. Необходимо всегда уметь выделить причину отказа.

Вся информация об отказах хранится в памяти компьютера и на машинных носителях. При накоплении данных вычисляются и уточняются значения показателей надежности.

Более консервативной формой представления сведений об отказах являются периодические отчеты об эксплуатации определенного количества однотипных систем (элементов). Обычно эти сведения оформляются в виде таблиц (ведомостей) отказов.



## **2.2. Второстепенные неисправности**

Второстепенные неисправности подразделяются на дефекты и неполадки.

**Дефектами** называются неисправности, которые в момент их обнаружения не приводят к повреждению или нарушению регулировки прибора, но могут в будущем вызывать подобные явления. Примеры дефектов: повреждение изоляции, царапины на защитных покрытиях, загрязнение смазки и др.

**Неполадками** называются неисправности в работе прибора, не оказывающие влияния на выполнение им основных функций. Примеры неполадок: выход из строя части зарезервированного устройства, не приводящий к перерыву в выполнении задачи; выход из строя счетчика времени работы прибора; перегорание лампочки освещения шкалы; увеличение шума и др.

*Из изложенного выше материала, очевидно, что понятие неисправности является более общим, чем понятие отказ.*

## **2.3. Надежность системы**

Система имеет весьма широкий обобщающий смысл и включает в себя такие понятия, как деталь, ячейка, узел, блок, механизм, прибор, устройство и другие аналогичные понятия [1].

Ниже приводятся определения этих терминов.

**Ячейка** – отдельная механическая конструкция, не имеющая самостоятельного функционального назначения.

**Узел (блок)** – несколько деталей, ячеек, объединенных для выполнения определенной функции, но не имеющих как целое самостоятельного эксплуатационного назначения. Примеры узлов: счетчик циклов, регистр команд, шифратор и дешифратор, сумматор и т.д.

**Устройство** - соединение деталей, узлов, имеющих самостоятельное эксплуатационное назначение. Например, блок питания, арифметическое устройство и др.

**Прибор** - группа блоков, имеющая конструктивно-самостоятельное назначение.

**Установка** - группа приборов.

В теории надежности обычно различают надежность систем и надежность входящих в них элементов.

**Система** – устройство, состоящее из нескольких установок. Система – это совокупность взаимосвязанных объектов, служащая для самостоятельного выполнения определенной задачи. Принципиально система может быть разбита на любое число элементов, необходимое для расчета ее надежности. Эта деструктуризация должна останавливаться на уровне таких функциональных элементов, для которых могут быть определены основные показатели надежности. Иногда вместо термина «система» употребляется аналогичный ему по смыслу термин «аппаратура». Для удобства анализа систем, их можно проклассифицировать по ряду признаков в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Классификация систем

№ п/п	Классификационные признаки	Вид системы
1	По возможности и целесообразности восстановления	Восстанавливаемые Невосстанавливаемые
2	По состоянию	Работоспособное Неработоспособное Предельное
3	По характеру обслуживания	Обслуживаемые Необслуживаемые
4	По поведению после отказа	Простые Сложные

Все системы можно разделить на две группы: *восстанавливаемые* (после отказов их можно ремонтировать) и *невосстанавливаемые*. Невосстанавливаемая система в случае возникновения отказа, не подлежит или не поддается восстановлению либо по экономическим, либо по техническим соображениям. Системы могут быть однократно и многократно использованы.

Различают следующие состояния системы:

- *работоспособное* (РБС) состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять технологическое задание, соответствуют требованиям нормативно-технической и конструктивной документации;
- *неработоспособное* (НРБС) состояние, если хотя бы один из параметров не соответствует указанным требованиям;
- *предельное* – состояние системы, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно, или нецелесообразно.

Динамика возможных состояний системы представлена на рис. 4.

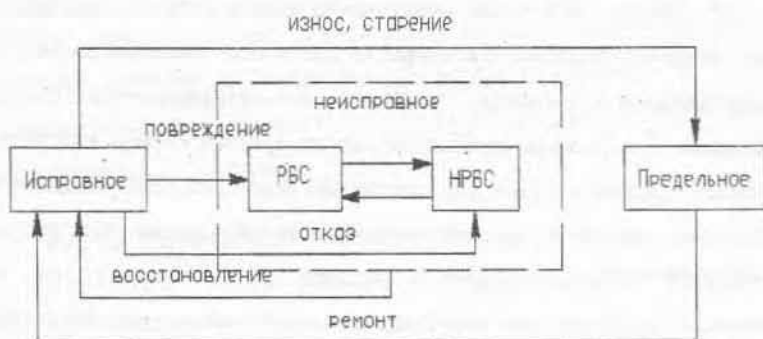


Рис. 4. Динамика возможных состояний системы

По характеру обслуживания системы бывают обслуживаемые и необслуживаемые. Те из них, которые выполняют свои задачи при наличии обслуживающего персонала и обычно приспособлены к устранению отказов во время эксплуатации, относятся к *обслуживаемым* системам.

*Необслуживаемые* системы выполняют возложенные на них функции без обслуживающего персонала. Эти системы могут быть самовосстанавливаемыми, т.е. приспособленными к самостоятельному устранению отказов без участия обслуживающего персонала, например, за счет автоматического резервирования.

Различают также простые и сложные системы.

*Простые* системы при отказе элементов либо полностью теряют работоспособность, либо продолжают выполнять свои функции в полном объеме, если отказавший элемент зарезервирован. Такие системы могут находиться только в двух состояниях: рабочем и нерабочем.

*Сложные* системы обладают способностью при отказе элементов продолжать выполнение своих функций, но с пониженной эффективностью, т.е. они могут находиться в нескольких рабочих состояниях.

К сложным системам обычно относят многоканальные комплексы с разветвленной структурой, состоящие из нескольких самостоятельных, но взаимосвязанных устройств, например автоматизированная система управления. Т.е. сложная система состоит из простых систем, подсистем, устройств, предназначенных для выполнения некоторой эксплуатационной задачи. Когда мы имеем дело со сложной системой, понятие «надежность» приобретает несколько условный характер. Это связано с тем, что элементы сложной системы могут находиться в большом числе состояний, каждое из которых характеризуется определенной надежностью.

Существует целый ряд особенностей испытания сложных систем:

1. Ограниченное число испытываемых объектов (это приводит к снижению вероятности достоверности оценки надежности).
2. Прямые непосредственные испытания на надежность связаны с расходом рабочего ресурса, а часто и с полным разрушением образца.
3. Сложно определить надежность такой системы, поскольку при ее работе возникают сложные процессы.
4. Большая перегруженность различными проверками и испытаниями технологии их производства и обслуживания.
5. Особенность самой технологии изготовления сложной системы. Такая система создается в результате длительного и сложного технологического процесса, который включает большое число разнообразных проверок и испытаний.

Наряду с вероятностными показателями все большее распространение начинают получать методы и методики детерминистического анализа надежности и безопасности сложных систем. В основе детерминистического анализа лежит стремление получить научно обоснованные сведения о надежности и безопасности системы при отсутствии достоверных вероятностных характеристик исходных событий и элементов исследуемой системы. В качестве примеров известных методов и подходов к детерминистическому анализу можно выделить следующие:

- методы "проверочного листа" и "Что будет, если ... ?", которые относятся к группе наиболее простых методов качественного анализа безопасности ;
- методы "Анализа видов и последствий аварий" (АВПО) и "Анализа видов, последствий и критичности аварий" (АВПКО), которые

применяются для более детального, глубокого и подробного качественного анализа возможных видов отказов в системе и их последствий;

- логико-графические методы анализа "деревьев отказов" и "деревьев событий", которые применяются для выявления комбинаций отказов оборудования, ошибок персонала и нерасчетных внешних воздействий, приводящих к аварийным ситуациям, а также последовательностей событий, характеризующих развитие аварийной ситуации;
- методы анализа отказоустойчивости, позволяющие качественно и (или) количественно оценить их способность продолжать функционировать при достоверном возникновении отказов отдельных и групп элементов исследуемой системы.

#### 2.4. Надежность элемента

**Элементом** называется часть системы, не имеющая самостоятельного эксплуатационного назначения и выполняющая в ней определенные функции. Элементами сложных систем являются отдельные устройства, агрегаты, установки. Понятие «элемент» в теории надежности является весьма широким. В ряде случаев одно и то же устройство может выступать либо в роли системы, либо в роли элемента, в зависимости от решаемой задачи и объекта исследования.

Элементы бывают типовые и специальные.

**Типовые** элементы применяются во многих различных системах и изготавливаются в массовом количестве в соответствии со стандартами.

*Специальные* элементы изготавливаются в небольших количествах только для использования в определенном устройстве (например, специальный импульсный трансформатор).

Элементы как и системы могут быть восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми.

С позиции надежности различают следующие виды соединений элементов: последовательное, параллельное и смешанное.

*Последовательным* называется такое соединение, при котором отказ одного любого элемента приводит к отказу системы. Это наиболее распространенный вид соединения элементов. Часто параллельное электрическое соединение элементов является последовательным с точки зрения теории надежности и изображается в виде последовательного соединения элементов на блок-схеме анализа надежности. Например, параллельно включенные конденсаторы искусственной линии на блок-схеме надежности представляются соединенными последовательно, так как пробой любого из них вызывает отказ установки (рис. 5 а).

*Параллельное* соединение элементов – это такое их включение, при котором отказ системы наступает только при отказе всех элементов. Подобное соединение применяется при резервировании. В данном случае функционально-необходимым для нормальной работы схемы является лишь один элемент соединения, а остальные играют роль резервных (рис. 5 б).

*Смешанное* соединение элементов представляет собой сочетание первых двух (рис. 5 в).

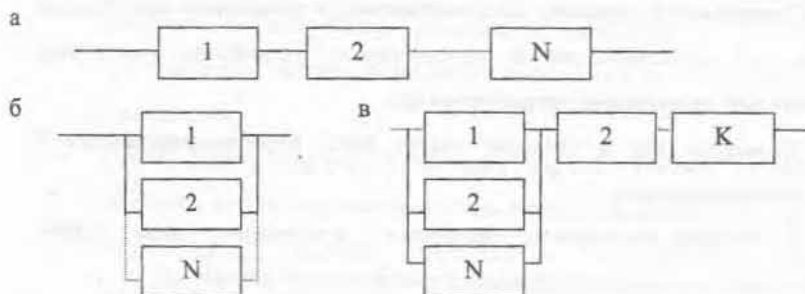


Рис. 5. Виды соединений элементов: а - последовательное; б - параллельное; в - смешанное

### 2.5. Разновидности надежности

Иногда для большей определенности и конкретизации различают следующие разновидности надежности: номинальную, эксплуатационную и техническую.

Под *номинальной надежностью* понимается надежность, достигаемая в результате проектирования и проверяемая в ходе испытаний опытных образцов.

Под *эксплуатационной надежностью* понимается надежность, определяемая в реальных условиях эксплуатации с учетом комплексного воздействия внешних и внутренних факторов, связанных с климатическими и географическими особенностями эксплуатации, реальными режимами работы системы и условиями ее обслуживания. Результаты контроля этого уровня дают информацию, на основании которой принимаются меры по повышению надежности на этапах проектирования и производства.

Под *технической надежностью* понимается надежность, которая формируется с учетом технологических условий производственных



процессов и оценивается по результатам контрольных испытаний партий изделий.

Надежность номинальная должна быть больше надежности технической, а та, в свою очередь, должна быть больше эксплуатационной. Эксплуатационная надежность должна быть больше надежности, указанной в техническом задании, поскольку оно обуславливает необходимость обратных информационно-управляющих связей в системе управления качеством.

### **Глава 3. Восстановление надежности систем управления**

Повышенный износ систем вызывается тяжелыми условиями эксплуатации, воздействием высоких давлений и температур при наличии влаги, кислот, щелочей и других веществ.

Условия работы многих систем связаны с большими нагрузками; вибрационными воздействиями, близкими к пределу, механические напряжения и коррозионные среды значительно сокращают сроки службы узлов и деталей. В этих условиях нормальное функционирование систем достигается систематическим наблюдением за их работой и состоянием, своевременным проведением профилактических осмотров, текущих ремонтов, регулировки, настройки и т.п.

Целью каждого ремонта является поддержание оборудования в постоянной технической исправности, обеспечивающей его максимальную производительность, высокое качество продукции и безопасную эксплуатацию.

### 3.1. Назначение ремонта

На целлюлозно-бумажных предприятиях, как и в других отраслях промышленности, за основу ремонта принята единая система *планово-предупредительного ремонта* (ППР).

Сущность системы ППР заключается в том, что каждая система наряду с повседневным уходом за ними проходит через определенные промежутки времени плановые профилактические осмотры и различные виды ремонта. Длительность этих промежутков определяется особенностями конструкции системы и ее техническим назначением, условием ее эксплуатации.

Система ППР позволяет решить на предприятиях следующие задачи:

- поддерживать системы в состоянии, обеспечивающем их нормальное функционирование; предотвращать случаи неожиданного (аварийного) выхода оборудования из строя;
- снижать расходы на ремонт систем;
- увеличивать производительность систем в результате модернизации их в ходе планового ремонта.

Система ППР включает в себя два вида работ: межремонтное обслуживание и периодическое выполнение плановых ремонтных операций, составляющих малый, средний и капитальный ремонты.

*Межремонтное обслуживание* оборудования представляет собой комплекс текущих работ, которые направлены на поддержание систем в постоянной технической готовности. Это, прежде всего наблюдение за состоянием систем, за выполнением обслуживающим персоналом правил эксплуатации, своевременная регулировка и настройка механизмов, устранение мелких неисправностей.

Система ППР предусматривает остановки оборудования в соответствии с графиком и позволяет заранее разрабатывать на предприятии технологию работ по всем видам ремонтов и рационально распределять ремонтных рабочих. За основу планирования ремонтов принимаются годовые графики ремонта технологического оборудования, на основании которых составляются квартальные и месячные графики ремонтов по цехам и видам оборудования.

### 3.2. Виды ремонтов

ППР разделяется по сложности и объему на три основных вида (рис. 6):



Рис. 6. Виды планово-предупредительного ремонта

При *текущем ремонте* заменяется или восстанавливается небольшое количество изношенных деталей, производится регулировка и настройка механизмов для обеспечения нормальной эксплуатации оборудования до очередного планового ремонта.

*Средний ремонт* включает в себя замену и восстановление изношенных деталей. Выполняются работы по обеспечению нормальной работы оборудования до очередного среднего или капитального ремонта. При этом выполняются все работы, относящиеся к текущему ремонту. Средние ремонты в зависимости от условий проведения ремонтов и наличия запасных деталей могут проводиться как узловым скоростным,

так и индивидуальным методом (замена отдельных деталей). Средний ремонт выполняется в соответствии с ведомостью дефектов и сметой.

**Капитальный ремонт** - наибольший по объему плановый ремонт, производимый с полной разборкой системы. При этом заменяются все или большинство изношенных деталей и узлов. Ремонтируются несменяемые базовые детали.

**Аварийный ремонт** выполняется при внезапном выходе оборудования из строя вследствие поломок или по другим причинам. По своему содержанию и объему этот вид ремонта может приближаться к текущему, среднему или капитальному в зависимости от фактических последствий аварии. Следует подчеркнуть, что при хорошей организации планово - предупредительного ремонта применения мер по предупреждению аварий необходимости в аварийных ремонтах не возникает.

#### Глава 4. Характеристики надежности

Большинство специалистов по теории надежности разделяют характеристики надежности на две группы: качественные и количественные. Количественное определение надежности не может быть сведено к определению одного только показателя надежности по тому, что надежность определяется множеством количественных характеристик и ни одна из них не может в полной мере выражать это понятие. Поэтому таким может быть только качественное определение, характеризующее определенные свойства конкретного изделия. Чаще всего стремятся использовать количественные характеристики, так как качественное определение надежности не позволяет выразить свойство надежность математически (числом). Это вызвало необходимость создать основные

критерии, с помощью которых можно было бы количественно оценить надежность различных элементов, дать сравнительную оценку надежности различных изделий [8].

Надежность системы зависит от количества и качества элементов, входящих в систему, от режимов работы элементов, от схемного и конструктивного выполнения. Надежность элементов сложной системы в свою очередь зависит от технологии изготовления, качества системы, качества материалов и т.п.

К числу широко применяемых критериев надежности относятся: вероятность безотказной работы за время  $t$ , вероятность отказов, среднее время безотказной работы, среднее время между соседними отказами (наработка на отказ), интенсивность отказов (опасность отказов), частота отказов, средняя частота отказов.

Критериями надежности могут быть также и коэффициенты, характеризующие различные показатели надежности аппаратуры: коэффициент готовности, коэффициент вынужденного простоя, коэффициент профилактики, коэффициент отказов, относительный коэффициент отказов, коэффициент расхода элементов, коэффициент стоимости эксплуатации.

Критериями надежности могут быть и различные отношения действительной и идеальной характеристик работы системы. *Характеристикой надежности* называют количественное значение критерия надежности для конкретной детали, узла, системы и т.д. Количественная оценка надежности позволяет: производить расчет надежности; сформулировать требования, предъявляемые к надежности вновь разрабатываемой аппаратуры; рассчитать предполагаемые ее сроки службы, сроки планового ремонта и профилактических работ.

## Глава 5. Резервирование

### 5.1. Избыточность

*Избыточность* – есть превышение веса, габаритов или стоимости системы по сравнению с минимально необходимыми для заданной структуры. Она связана с обеспечением заданной надежности. Т.е. дополнительные средства и возможности сверхминимально необходимых для выполнения системой заданных функций.

*Задача введения избыточности* – обеспечить нормальное функционирование системы после возникновения отказов в ее элементах.

Создание более простой структуры, в особенности, если она получена в результате объединения по какому-либо критерию качества, всегда приводит к ухудшению таких важных показателей, как качество переходного процесса, устойчивость и точность. Следовательно, единственным способом сохранения этих важных характеристик в течение длительного времени является повышение надежности автоматической системы при заданной ее структуре. Для повышения надежности часто приходится или выбирать наиболее качественные элементы, обладающие высокой надежностью, либо облегчать режимы работы элементов, или вводить резервную аппаратуру. Все это требует увеличения стоимости, веса и габаритов аппаратуры и приводит к некоторой избыточности системы по указанным характеристикам.

### 5.2. Методы резервирования

*Резервированием* называется способ повышения надежности путем включения резерва, предусмотренного при разработке конструкции или в процессе ее эксплуатации.

Использование резервирования связано обычно с увеличением веса, объема, стоимости изготовления и эксплуатации объектов. В связи с этим необходимо подобрать оптимальный способ резервирования, который наилучшим образом соответствовал поставленной задаче. Но нельзя ограничиваться учетом стоимости изготовления и эксплуатации резервной системы. Очевидно, что необходимо учитывать и ущерб, вызванный появлением отказов системы. Обычно в этот ущерб входят материальные потери из-за простоев оборудования и в результате снижения производительности.

Классификация резервирования представлена в табл. 4 и в табл. 5.

Таблица 4

Классификация по признакам

№ п/п	Классификационные признаки	Виды резервирования
1	По методу	Общее Раздельное
2	По кратности	С целой кратностью С дробной кратностью
3	По способу включения	Постоянное Замещением
4	По виду избыточности	Информационное Структурное Временное Функциональное
5	По режиму работы	Нагруженный Облегченный Ненагруженный
6	По сопротивлению отказу	Активное Пассивное
7	По возможности восстановления	С восстановлением Без восстановления

## Классификация резервирования

Резервирование							
целая кратность				дробная кратность			
<i>общее</i>		<i>раздельное</i>		<i>общее</i>		<i>раздельное</i>	
<i>постоянное</i>	<i>замещением</i>	<i>постоянное</i>	<i>замещением</i>	<i>постоянное</i>	<i>замещением</i>	<i>постоянное</i>	<i>замещением</i>
	Нагруженный резерв		Нагруженный резерв		Нагруженный резерв		Нагруженный резерв
	Облегченный резерв		Облегченный резерв		Облегченный резерв		Облегченный резерв
	Ненагруженный резерв		Ненагруженный резерв		Ненагруженный резерв		Ненагруженный резерв

*Расчетно-логической схемой резервированной системы* в большинстве случаев является схема, на которой элементы системы имеют параллельно-последовательное соединение.

Имеется два вида резервирования – резервирование системы в целом (*резервирование общее*) (рис. 7) и резервирование системы по элементам (*резервирование раздельное*) (рис. 8).

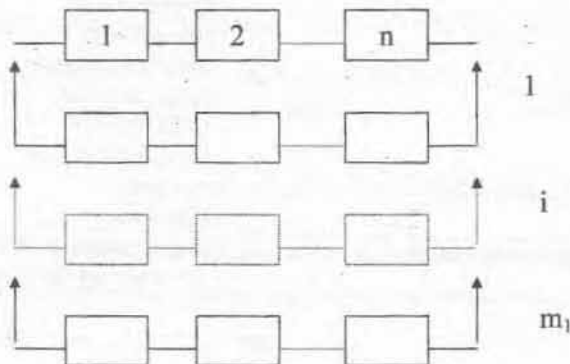


Рис. 7. Схема общего резервирования



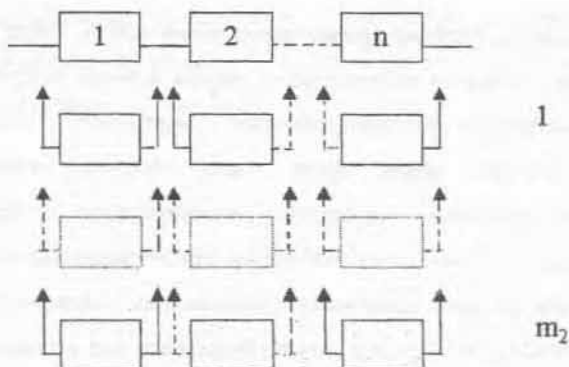


Рис. 8. Схема раздельного резервирования

Резервирование раздельное имеет следующее преимущество – выигрыш в надежности при прочих равных условиях выше, чем при общем резервировании. Резервирование системы по элементам особенно выгодно при большом числе и увеличении кратности резервирования.

Одной из разновидностей общего является *автономное резервирование*. Оно заключается в использовании нескольких независимых объектов, выполняющих одну и ту же задачу. При этом каждый из этих объектов имеет свой вход и выход и обычно независимые источники питания. Такое резервирование применяется при проведении ответственных экспериментов в системах ответственного резервирования. Примером автономного резервирования является совокупность устройств телеизмерения, выполняющих одну и ту же задачу, если каждое устройство имеет свои входные датчики, записывающие (выходные) блоки и источники питания.

Под *кратностью резервирования* понимается отношение числа резервных элементов расчета к числу резервируемых – основных.

*Резервирование с целой кратностью* имеет место, когда один основной элемент резервируется одним и более резервными элементами.

*Резервирование с дробной кратностью* имеет место, когда два и более однотипных элементов резервируются одним и более резервными элементами. Наиболее распространенным вариантом дробного резервирования является такой, когда число основных элементов превышает число резервных. Примером резервирования с дробной кратностью является система энергоснабжения, обеспечивающая питание некоторой нагрузки от пяти параллельно работающих генераторов при условии, что любой из генераторов может выдержать достаточно долго дополнительную нагрузку в 25 % от номинального режима [2].

Очевидно, что при отказе любого генератора, четыре оставшихся исправных генератора смогут обеспечить выполнение своих функций, работая с перегрузкой в 25 %. Т.е. при расчете надежности такой системы электроснабжения имеет место резервирование с дробной кратностью при  $m=1/4$  (для обеспечения надежной работы системы электроснабжения достаточно иметь четыре генератора при одном резервном).

Резервирование, кратность которого равна единице и разные источники энергоснабжения, называется *дублированием*.

Элементы резервирования можно включать на все время эксплуатации или при отказе основных элементов. Существует два способа включения резерва – *постоянное и замещением*.

*Резервирование постоянное* – резервирование, при котором резервные элементы участвуют в функционировании объекта наравне с основными. Для постоянного резервирования существенно, что в случае отказа основного элемента не требуется специальных устройств для введения в действие резервный элемент, поскольку он вводится в действие одновременно с основным (рис. 9, а).

*Резервирование замещением* – это такое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного (рис. 9, б).

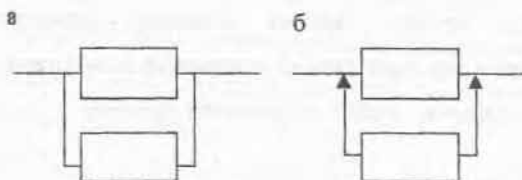


Рис. 9. Резервирование: а - постоянное; б - замещением

Достоинства резервирования при постоянном включении резерва:

- простота, так как в этом случае не требуется никаких переключающих устройств;
- отсутствие перерывов в работе.

Недостатком резервирования при постоянном включении резерва:

- нарушение режима работы резервных элементов при отказе основного элемента.

Достоинства резервирования при включении резерва замещением:

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

Существенный недостаток этого способа включения резерва заключается в необходимости наличия переключающих устройств. При резервировании системы по элементам, число переключающих устройств равно числу основных функциональных элементов, что может значительно понизить надежность всей системы. Поэтому резервировать замещением

выгодно только крупные узлы или всю систему, а во всех других случаях – при высокой надежности переключающих устройств.

Также имеется *скользящее резервирование* – это резервирование замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший элемент в данной группе (рис. 10).

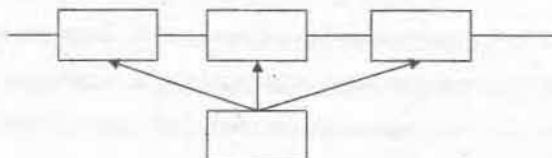


Рис. 10. Скользящее резервирование

В зависимости от вида избыточности различают [1], [2]:

1. **Информационное резервирование** предусматривает использование избыточной информации. Использование информационного резервирования влечет за собой необходимость введения избыточных элементов. Пример информационного резервирования, многократная передача одного и того же сообщения по каналу связи.
2. **Структурное резервирование**, предусматривает использование избыточных элементов объекта. В минимально необходимый вариант системы, элементы которой называют основными, вводятся дополнительные элементы, устройства либо даже вместо одной системы предусматривается использование нескольких идентичных систем. Это делается для повышения безотказности систем. При этом эти избыточные резервные структурные элементы имеют единственное назначение – взять на себя выполнение рабочих функций при отказе соответствующих основных элементов.

3. *Временное резервирование* предусматривает использование избыточного времени. Создается за счет повышения производительности аппаратуры, без инерционности его элементов и т.п. Предполагается возможность возобновления прерванного в результате отказа функционирования аппаратуры путем ее восстановления. Например, в автоматических производственных линиях предусматривают накопители изготавливаемых деталей, что при повышенной производительности оборудования позволяет допускать ограниченные во времени перерывы в работе отдельных звеньев линии без нарушения процесса обработки деталей на отдельных технологических операциях.

4. *Функциональное резервирование* - резервирование с применением функциональных резервов. Такой вид резервирования характерен для многофункциональных систем. Возможны случаи его использования: либо отказ многофункционального элемента позволяет далее использовать его в данном объекте для других целей, либо такой элемент в случае отказа другого элемента данного объекта принимает на себя выполнение функций отказавшего элемента в дополнение к своим основным функциям. Такое резервирование может иметь место при решении системы одной задачи при различных способах функционирования. Например, передача информации различными способами в зависимости от того, какие элементы объекта остались работоспособными.

В некоторых случаях резервирования, при появлении отказа структура объекта перестраивается и объект восстанавливает свою работоспособность. В этом случае объект активно реагирует на появление отказа, следовательно такое резервирование называется *активным*.

В зависимости от режима работы резервных элементов различают:

1. *Нагруженный резерв (горячий)* – резервный элемент находится в том же режиме, что и основной. Ресурс резервных элементов в этом случае начинает расходоваться с момента включения в работу системы.
2. *Облегченный резерв (теплый)* - резервный элемент находится в менее нагруженном режиме, чем основной. Ресурс резервных элементов начинает расходоваться с момента включения всей системы в работу, но при этом интенсивность расхода ресурса резервных изделий до момента включения их в место отказавших значительно ниже, чем в обычных рабочих условиях.
3. *Ненагруженный резерв (холодный)* – резервный элемент практически не несет нагрузки. Другими словами, условия, в которых находится резерв, настолько легче рабочих, что практически резервные элементы начинают использовать свой ресурс только с включения их в работу в место отказавших.

При *пассивном резервировании* объекта отказ одного или нескольких элементов не влияет на его работу. Элементы соединены постоянно, перестроение структуры не происходит. Объект в данном случае «пассивно» сопротивляется появлению отказов элементов. Поэтому в системах с пассивным резервированием большое значение имеют условия работы элементов после появления отказа, т.е. стабильность нагрузки на элементы, оставшиеся работоспособными.

Если структура объекта такова, что при появлении отказа она перестраивается и объект восстанавливает свою работоспособность. При этом система активно реагирует на появление отказа, в результате чего данный метод резервирования называется *активным резервированием*.

Надежность систем в весьма значительной степени определяется тем, применено ли резервирование с восстановлением или без него.

*Резервированием с восстановлением* называется такое, при котором работоспособность любого основного и резервного элементов системы в случае возникновения отказов подлежит восстановлению в процессе эксплуатации системы.

В противном случае имеет место *резервирование без восстановления*.

Также встречается *мажоритарное резервирование* - метод повышения надежности с принципами «голосования». Для этого используют несколько устройств, одновременно выполняющих одни и те же функции (например, четыре бортовых компьютера из пяти управляют космическим кораблем «Space Shuttle» на режиме взлета). Это позволяет при выходе из строя одного из устройств (одновременный выход из строя двух и более устройств, считается маловероятным) решать сразу две задачи малых затрат времени: выработать правильный выходной сигнал и определить место возникновения отказа. Решение о том, какой сигнал должен быть на выходе, принимается методом «голосования», т.е. по большинству выходных сигналов отдельных устройств. Выработка общего выходного сигнала осуществляется мажоритарным элементом (элементом голосования). Для определения места отказа имеется элемент анализа, который работает параллельно с мажоритарным элементом и указывает вышедшее из строя устройство [5].

При *толерантном резервировании* системы для обнаружения устранения собственных неисправностей не требуется вмешательство человека. Например, толерантность бортовых вычислительных систем космического корабля «Space Shuttle» достигается при одновременном использовании трех форм избыточности: аппаратной, программной и временной [5].

*Внутриэлементное резервирование* заключается в резервировании внутренних связей элементов. Использование такого способа резервирования связано с изменением конструкции элемента.

Резервирование является мощным средством повышения надежности системы, так как при резервировании надежность системы может быть принципиально выше надежности любого элемента. В этом принципиальное отличие повышения надежности резервированием от всех остальных способов ее повышения.

Если мы имеем дело с восстанавливаемыми объектами, то для получения максимального эффекта от применения резервирования необходима совершенная система контроля, которая в состоянии мгновенно обнаружить появление неработоспособного состояния любого элемента. На самом деле контролируется лишь какая-то часть элементов и возможны ложные сигналы о неработоспособности объекта из-за отказов системы контроля или ошибок персонала, неправильно оценивающего показания прибора. Если в первом случае мы имеем дело с неполным контролем, то во - втором с неидеальным контролем. Кроме того, контроль может производиться периодически или в случайные моменты времени. Часто возникает такая ситуация, когда не удается осуществить одинаковый контроль основного и резервного элементов. Все эти аспекты оказывают существенное влияние на эффективность резервирования.

Схема классификации резервирования представлена на рис. 11.





Рис. 11. Классификация резервирования

Анализ различных методов резервирования позволяет сформулировать основные его свойства.

1) Основное положительное свойство резервирования состоит в том, что оно позволяет из малонадежных элементов проектировать надежные системы. Это свойство всякого резервирования выгодно отличает его от остальных методов повышения надежности.

2) Выигрыш надежности по вероятности отказов всегда начинается с нуля и асимптотически стремится к единице независимо от надежности резервированной системы и ее элементов. При этом скорость роста выигрыша надежности по вероятности отказов тем выше, чем менее надежна основная система и чем ниже кратность резервирования.

3) Среднее время безотказной работы при резервировании с дробной кратностью может быть меньше, чем среднее время безотказной работы не резервированной системы. Это имеет место при условии, если число резервных систем меньше числа основных. С ростом кратности резервирования выигрыш надежности по среднему времени безотказной работы растет, причем скорость роста существенно убывает с ростом кратности резервирования. Это свойство также присуще общему и поэлементному резервированию с постоянно включенным резервом.

4) Характерная особенность сложных систем разового применения состоит в том, что большую часть времени они находятся в состоянии хранения. Очевидно, что в момент включения такой системы в работу все ее элементы должны быть исправными. Это означает, что выход из строя хотя бы одного элемента резервированной системы в процессе ее хранения следует считать отказом всей системы. Так как число элементов резервированной системы всегда выше числа элементов не резервированной системы, то первая всегда будет иметь большую опасность отказов.

*Отмеченные свойства резервирования позволяют сделать следующие важные выводы:*

- *резервирование как средство повышения надежности наиболее целесообразно применять для повышения надежности сложных систем, предназначенных для короткого времени непрерывной работы, использование резервирования для повышения надежности*

систем, предназначенных для длительного времени работы, часто требует высокой кратности резервирования, что ограничивает его использование в системах, которые критичны в отношении веса, габаритов или стоимости;

- повышение надежности системы путем ее резервирования осуществляется за счет ухудшения таких ее характеристик, как вес, габариты, стоимость, усложнение условий эксплуатации.

## Глава 6. Долговечность

### 6.1. Срок службы

**Срок службы** – это время от начала эксплуатации аппаратуры до ее технической непригодности. Сложные системы, как и ее элементы, не могут эксплуатироваться бесконечно. В процессе эксплуатации, в период хранения, транспортировки происходит старение элементов. **Назначение срока службы** – календарная продолжительность эксплуатации объекта, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено. Большое число отказов ведет к тому, что дальнейшая эксплуатация нецелесообразна или невозможна. Это время и характеризуется сроком службы аппаратуры.

Существует **гамма - процентный срок службы** - это календарная продолжительность эксплуатации объекта, в течение которой он не достигает предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах [3].

Некоторые системы практически никогда не достигают предельного состояния и снимаются с эксплуатации только в результате морального устаревания. Примером такой системы может служить городской транспорт. В этих системах элементы заменяются новыми без ущерба для функционирования.

Назначение срока службы может производиться по техническим или экономическим показателям.

Можно отметить что, чем выше срок службы элементов при прочих равных условиях, тем выше срок службы системы.

В документации, прилагаемой к системе, всегда указывается *гарантийный срок службы*. Это говорит о том, что если в течение гарантийного срока произойдет отказ, то не потребитель, а предприятие, установившее этот срок, будет нести юридическую ответственность, т.е. предприятие выполняет ремонт отказавшей системы, или в том случае если система не подлежит восстановлению, заменяет ее исправной.

*Необходимо обратить внимание, что гарантийный срок службы всегда меньше срока службы.*

## **6.2. Ремонтпригодность**

Совместно с надежностью ремонтпригодность характеризует способность системы выполнять заданные функции в любой момент времени. Чем надежнее система и чем выше ее ремонтпригодность, тем реже она отказывает и меньше простаивает, т.е. тем выше вероятность заставить систему в любой момент времени в исправном состоянии.

*Ремонтпригодность* – свойство элемента или системы, заключающееся в приспособленности к обнаружению отказов, к их предупреждению и восстановлению работоспособного состояния в процессе обслуживания и ремонта.

Если система имеет высокую надежность и редко отказывает, но, имея низкую ремонтпригодность, требует больших затрат времени на профилактику и восстановление, то она не всегда может конкурировать с системой, которая менее надежна, но зато время ее простоя, необходимое

для профилактики и восстановления, мало. В данном случае первая аппаратура может потребовать большего резерва, чем вторая.

Время, необходимое для восстановления, так же как и время возникновения отказов, является величиной случайной, зависящей от характера отказов, квалификации и опыта обслуживающего персонала, организации ремонта и т.д. [8].

Это понятие не имеет смысла для таких систем разового использования, которые не восстанавливаются ни в процессе хранения, ни в процессе работы.

### *6.3. Сохранность*

*Сохранность* – свойство системы находиться в исправном состоянии, т.е. сохранять свои характеристики, обеспечивающие выполнение заданных функций, в процессе хранения во времени.

Хранение есть неотъемлемая часть эксплуатации, следовательно, термин «сохранность» отождествляется с понятием надежности для специфических условий – хранения системы. Очевидно, что сохранность зависит от многих факторов, большая часть которых имеет случайный характер. Для того чтобы оценить сохранность системы необходимо располагать критериями надежности.

Так как хранение системы может длиться достаточно длительный период времени, для того, чтобы спрогнозировать сохранность системы, необходимо смоделировать этот процесс путем ускорения испытания сохранности.

Сохранность является важным техническим понятием. Она дополняет понятие надежности и вместе с ним определяет надежность системы в различных ее состояниях.

Имеется такая система, у которой время хранения примерно равно времени их работы, а иногда во много раз его превосходит – это системы разового использования и системы с малым коэффициентом использования. К таким системам относятся также запасные части и приборы, хранящиеся на складе [8].

#### **6.4. Старение**

*Старение* - это необратимый процесс изменения параметров и характеристик элементов и систем.

Старение элементов, как и их изнашивание, приводит к отказам в тот момент, когда изменения параметров превышает допустимые отклонения от норм. Старение – это непрерывный процесс, который ускоряется под силой воздействия внешней среды (влаги, давления, света, тепла). Явление «старение» наблюдается у всех элементов системы без исключения. Но в большей мере проявляется у изолирующих материалов органического происхождения. Например, каучуковые материалы становятся жесткими и ломкими, покрываются трещинами.

### **Глава 7. Техническое обслуживание**

*Техническое обслуживание* - это комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на предупреждение отказов, на обеспечение исправного состояния в процессе эксплуатации и готовности к использованию.

*Задачи технического обслуживания:*

- 1) предупреждение ускоренного износа и старения;

- 2) устранение последствий износа и старения;
- 3) поддержание основных технических характеристик;
- 4) продление межремонтных сроков эксплуатации аппаратуры.

Основу технического обслуживания составляют профилактика и регламентированные проверки.

*Целью профилактических работ* является выявление ненадежных, отказавших или неисправных элементов, установление причин, способствующих возникновению отказов.

*Содержание профилактических работ:* чистка аппаратуры, ее узлов и элементов: механические, смазочные периодические и сезонные работы.

Различают несколько методов назначения сроков проведения мероприятий по техническому обслуживанию [4]: календарный, регламентированный, комбинированный, по техническому состоянию объектов.

*Календарный метод* – состоит в проведении технического обслуживания в зависимости от срока службы объектов, т.е. календарного времени их эксплуатации. Метод применяется для объектов, подверженных старению.

*Регламентный метод* состоит в проведении обслуживания по достижении определенной наработки (например, километры пробега).

*Комбинированный метод* применяется, если одновременно аппарат подвергается износу и старению, цель которого назначить сроки проведения работ по техническому обслуживанию.

При назначении сроков проведения мероприятий по техническому обслуживанию изучаются различные планы их проведения. Эти планы получили условное название *стратегии технического обслуживания*.

Имеется плановая и смешанная стратегии. При *плановой стратегии* мероприятия по техническому обслуживанию проводятся через равные периоды наработки (срока службы) независимо от количества произошедших за это время отказов. При *смешанной стратегии* проводятся мероприятия двух видов: плановые и аварийные. *Плановые мероприятия* проводятся при отсутствии отказов через постоянное время  $t$ . Если происходит отказ объекта, то он устраняется и объект подвергается *аварийному* техническому обслуживанию. Время до следующего очередного планового мероприятия по техническому обслуживанию отсчитывается от момента окончания предыдущего (планового или аварийного). В настоящее время чаще всего применяется плановая стратегия технического обслуживания из-за удобства ее планирования.

Техническое обслуживание может включать работы по регулированию определяющих параметров, устранению дефектов, контролю и восстановлению работоспособности.

При техническом обслуживании наряду с положительным действием часто имеют нежелательные последствия проникновения внутрь объекта. При проведении осмотров и работ иногда приходится осуществлять частичный демонтаж и монтаж объекта — отсоединять разъемы, снимать кожухи, открывать люки, менять фильтры и т.д. А также могут производиться зачистка, продувка, промывание и другие работы, в ходе которых детали и узлы испытывают необычные механические нагрузки. Эти нагрузки изменяют распределение внутренних механических напряжений в деталях и узлах системы, нарушают установившееся ранее, до проведения работ, динамическое равновесие. После проведения работ по техническому обслуживанию часто наблюдается всплеск параметра потока отказов. Всплеск зависит от



технологичности обслуживания объекта и культуры технического обслуживания. В том случае, если объект не нужно разбирать при проведении работ по техническому обслуживанию, то временное увеличение значений параметра потока отказов обычно отсутствует.

Для снижения потока отказов необходимо, чтобы техническим обслуживанием занимался высококвалифицированный персонал, имеющий хороший инструмент и технические приспособления.

## Глава 8. Элемент расчета надежности

*Элементом расчета надежности* называется устройство, имеющее количественную характеристику надежности, самостоятельно учитываемую при расчете надежности соединения.

Термин «элемент расчёта надежности» имеет большое практическое значение при выполнении инженерных расчетов надежности сложных систем. Расчет надежности системы ведется по известным количественным характеристикам надежности элементов, входящих в нее. Для оценки надежности системы определяют интенсивность отказов. Общая интенсивность отказов основных элементов системы позволяет ответить на вопрос, каково будет среднее время безотказной работы системы, состоящей из многих элементов различного типа, подвергающихся воздействию электрических, температурных и других нагрузок.

Обычно при расчете надежности сложных систем рассчитывают вероятность их безотказной работы. Расчет ведется по известным количественным характеристикам надежности деталей, приборов, соединений и т.п., входящих в систему. Т.е. вначале определяется количественные характеристики надежности их деталей и элементов, затем вычисляются количественные характеристики надежности системы.

Определяется тип каждого отдельного элемента, его характеристика и т.д. Расчету надежности должны предшествовать подробная проверка соответствия элементов ТУ на систему в целом, а также изучение окружающих условий режима работы элементов с тем, чтобы обеспечить возможность применения наиболее рациональных методов расчета.

Выбирается метод расчета с последующим подбором определенных номограмм, таблиц, графиков или поправочных коэффициентов.

Определяются эквивалентные постоянно действующие электрические нагрузки и влияние внешней среды на каждый элемент.

Определяются по соответствующей таблице или графику интенсивности отказов каждого элемента.

При расчете надежности системы целесообразно придерживаться следующего порядка.

1. Формулируется понятие отказа конкретной системы. При расчете надежности необходимо учитывать только те элементы, выход из строя которых приводит к отказу. Часто в сложных системах имеются элементы, выход из строя которых приводит лишь к ухудшению некоторых характеристик системы (точности, качества переходного процесса и т.д.). Отказы других элементов приводят к нарушению работоспособности системы, т.е. с точки зрения надежности элементы системы не равнозначны. Следовательно, прежде чем приступить к расчету надежности, необходимо четко сформулировать, что следует понимать под отказом системы, а затем уже выбирать число элементов, которые должно быть учтено при расчете вероятности исправной работы, или при расчете других количественных характеристик надежности.

2. Составляется схема расчета надежности. Схему расчета удобно составить таким образом, чтобы элементами расчета были конструктивно оформленные блоки. Может оказаться, что в этих блоках имеются элементы, работающие только некоторую часть времени. В этом случае целесообразно такие элементы распределить по времени их работы на группы и образовать из этих групп самостоятельные элементы расчета.
3. Выбирается метод расчета надежности. В соответствии с типом соединения элементов выбираются расчетные формулы.
4. На основании результатов расчетов надежности делается вывод о годности системы по параметру надежности и составляются рекомендации, направленные на повышение надежности рассчитываемой системы.

Элементы расчета могут иметь или основное, или резервное соединение.

*Основным соединением элементов расчета* называется такое, при котором отказ любого элемента ведет к отказу всего соединения.

*Резервным соединением элементов расчета* называется такое, при котором отказ соединения наступает только в том случае, если отказали основной и все резервные элементы.

*Чаще всего сложная система состоит из элементов расчета, часть которых имеет основное соединение, а часть – резервное [8].*

## Глава 9. Запасные части

При эксплуатации аппаратуры важную роль играют запасные части, которые необходимы при отказах, чтобы уменьшить время простоя оборудования.

**Запасная часть (ЗЧ)** - составная часть системы, предназначенная для замены находящейся в эксплуатации такой же части в целях поддержания или восстановления работоспособности системы. Запасные части объединяют в комплекты [6]:

- 1) **одиночный**, который предназначен для поддержания в работоспособном состоянии путем проведения технических обслуживаний и технического ремонта силами эксплуатирующего его персонала в объеме требований эксплуатационной документации;
- 2) **групповой**, нужен для обеспечения технического обслуживания и ремонта объектов с истекшими гарантийными сроками эксплуатации, силами ремонтного подразделения эксплуатирующей организации в размере требований эксплуатационной документации. Его используют так же для пополнения одиночного комплекта. Он поставляется предприятием вместе с соответствующей группой объектов один раз на все время их эксплуатации;
- 3) **ремонтный** предназначен для ремонта группы элементов на ремонтных предприятиях, поставляется отдельно от оборудования и хранится на складах ремонтных предприятий;
- 4) **россыпью**, предназначен для пополнения групповых и ремонтных комплектов при техническом обслуживании и ремонте;
- 5) **эксплуатационные материалы** предназначены для использования при техническом обслуживании и ремонте оборудования. К таким материалам относятся смазки, лаки.

Недостаточно обоснованный состав комплектов ЗЧ приводит, с одной стороны, к созданию неиспользуемых запасов на складах служб материально-технического обеспечения систем, а с другой, - к значительному дефициту некоторых элементов.

Оптимизация состава ЗЧ и системы их обеспечения повышает эффективность использования элементов во время эксплуатации; уменьшает дефицит необходимых ЗЧ; сокращает неиспользуемые запасы на складах материально-технического обеспечения; уменьшает расходы на приобретение, доставку и хранение ЗЧ; устанавливает номенклатуру и количество запасных элементов.

Основная задача расчета комплектов ЗЧ состоит в обосновании номенклатуры запасных частей и их количества. Для ее решения требуются специальные методы. Состав заменяемых частей зависит от многих факторов:

- ресурса заменяемых частей и степени его использования;
- годовой наработки и межремонтного ресурса элементов;
- степени старения и износа элементов;
- внешних воздействий;
- условий эксплуатации.

Для установления номенклатуры ЗЧ анализируются конструкция системы, технологические возможности по замене элементов в зависимости от сил и средств технического обслуживания и ремонта. Так, при определении номенклатуры одиночного комплекта анализируются возможности персонала, эксплуатирующего систему (квалификация, наличие времени с учетом конструкции системы). При определении номенклатуры ЗЧ группового комплекта учитываются технологические возможности ремонтного подразделения (предприятия, базы), а также наименование элементов, подлежащих планово-предупредительным заменам [6].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоглазов И.Н., Кривцов А.Н., Куценко Б.Н., Суслова О.В. Диагностика и надежность автоматизированных систем. СПб.: Руда и металлы, 2004. 167 с.
2. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надежности автоматических систем управления. Л.: Энергоатомиздат (Ленингр. отд-ние), 1984. 208 с.
3. ГОСТ 27.002 – 89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 25 с.
4. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. 480 с.
5. Иванов С.И. Основы теории и расчета показателей надежности/ КнАГТУ, Комсомольск – на – Амуре, 2000. 54 с.
6. Калявин В.П. Основы теории надежности и диагностики. СПб.: Элмор, 1998. 178 с.
7. Мартынов А.А., Долгополов Г.А. Основы теории надежности и диагностики/ НГавт. Новосибирск, 1999. 108 с.
8. Половко А.М. Основы теории надежности. М.: Наука, 1964. 446 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>Раздел 1. ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ</b> .....	-
<b>Глава 1. Понятие надежности и ее особенности</b> .....	-
1.1. Теория надежности.....	-
1.2. Надежность.....	7
1.3. Проблемы надежности.....	9
1.4. Повышение надежности.....	12
<b>Глава 2. Определение основных критериев систем управления</b> .....	15
2.1. Отказ.....	-
2.2. Второстепенные неисправности.....	23
2.3. Надежность системы.....	-
2.4. Надежность элемента.....	28
2.5. Разновидности надежности.....	30
<b>Глава 3. Восстановление надежности систем управления</b> .....	31
3.1. Назначение ремонта.....	32
3.2. Виды ремонтов.....	33
<b>Глава 4. Характеристики надежности</b> .....	34
<b>Глава 5. Резервирование</b> .....	36
5.1. Избыточность.....	-
5.2. Методы резервирования.....	-
<b>Глава 6. Долговечность</b> .....	49
6.1. Срок службы.....	-
6.2. Ремонтпригодность.....	50
6.3. Сохранность.....	51
6.4. Старение.....	52
<b>Глава 7. Техническое обслуживание</b> .....	-
<b>Глава 8. Элемент расчета надежности</b> .....	55
<b>Глава 9. Запасные части</b> .....	57
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	60