

В. И. Сидельников

**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**

Часть 1

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**
Высшая школа технологии и энергетики

В. И. Сидельников

**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**

Часть 1

Учебное пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2023

УДК 681.5.03

ББК 30

С 347

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики

Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

В. П. Яковлев;

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации химической промышленности Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)

Л. А. Русинов

Сидельников, В. И.

С 347 Диагностика и надежность автоматизированных систем управления. Часть 1: учебное пособие/ В. И. Сидельников. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. — 53 с.

ISBN 978-5-91646-348-4

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам дисциплины «Диагностика и надежность автоматизированных систем управления» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки: 27.03.04 «Управление в технических системах» и 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Учебное пособие предназначено для магистрантов всех форм обучения.

УДК 681.5.03

ББК 30

ISBN 978-5-91646-348-4

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023

© Сидельников В. И., 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПОНЯТИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ.....	6
1.1. Теория надежности.....	6
1.2. Надежность. Что такое надежность.....	8
1.3. Проблемы надежности.....	10
1.4. Повышение надежности.....	11
ГЛАВА 2. ТЕРМИНЫ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ.....	14
2.1. Состояние объекта с точки зрения надежности и безотказности.....	14
2.2. Отказы.....	15
ГЛАВА 3. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ.....	23
3.1. Система с точки зрения надежности.....	23
3.2. Разновидности надежности.....	25
3.3. Элемент. Виды соединения элементов.....	26
3.4. Понятие элемента расчета надежности.....	27
3.5. Проектная оценка надежности АСУ.....	29
ГЛАВА 4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ.....	31
4.1. Избыточность.....	31
4.2. Методы резервирования.....	32
ГЛАВА 5. РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ. СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА.....	40
5.1. Техническое обслуживание.....	40
5.2. Назначение ремонта.....	42
5.3. Запасные части.....	45
ГЛАВА 6. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.....	47
ГЛАВА 7. СОХРАНЯЕМОСТЬ.....	49
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	51

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие является переработанным и дополненным изданием учебного пособия «Диагностика и надежность автоматизированных систем», выпущенного авторами Хмельницким А. К., Пожитковым В. В., Кондрашковой Г. А. в 2005 году. Необходимость издания нового учебного пособия связана с появлением новых национальных стандартов Российской Федерации ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» и ГОСТ Р 27.101–2021 «Надежность в технике. Надежность выполнения задания и управления непрерывной деятельностью», а также изменением учебных планов и рабочих программ дисциплин по надежности и диагностике, повышением требований к обеспечению надежности автоматизированных систем. Это отражено при изложении текста и введением новых материалов во всех разделах предыдущего издания.

ВВЕДЕНИЕ

Уровень автоматизации производства – важнейший показатель технического прогресса. Комплексная автоматизация дает возможность увеличить количество и повысить качество промышленной продукции. Более того, ряд отраслей производства и областей научных исследований (таких, например, как атомная промышленность или исследование космического пространства) вообще не могло бы существовать без автоматики и телемеханики. Но чем больше и ответственнее служба автоматических устройств в современном производстве, тем более жесткие требования предъявляются к их надежности. Уровень надежности – важнейший показатель качества любого устройства или автоматизированной системы. В тесной связи с вопросами надежности находятся и проблемы технической диагностики, т.е. обнаружение отказов и неисправностей, локализация и выявление причин их возникновения.

Первые теоретические работы по вопросам надежности появляются в 40-х годах XX века. В 50-е годы была осознана необходимость внедрения в практику методов исследования и расчета надежности, что было связано с развитием сложных электронных систем связи, радиолокации, навигации, а в дальнейшем и автоматизированных производственных систем. В 60-е годы теория надежности окончательно сложилась как отдельная отрасль знаний. В это же время, а особенно в 70-е годы развивается, как научная дисциплина, техническая диагностика. Разработки той поры нашли отражение в книгах [1, 2, 3], сохранивших свое значение до сих пор. Некоторые из них переизданы в последние годы. Развитие теории надежности и технической диагностики применительно к современным системам автоматизации продолжается и в настоящее время [4, 5, 6].

ГЛАВА 1. ПОНЯТИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

1.1. Теория надежности

Теория надежности – научная дисциплина, изучающая общие закономерности, которых следует придерживаться при проектировании, производстве, приемке, транспортировании, эксплуатации и хранении изделий и устройств для достижения максимальной эффективности и безотказности их использования. В свою очередь, эксплуатация включает в себя совокупность различных фаз существования, начиная с подготовки к использованию, собственно эксплуатацию, а также техническое обслуживание и ремонт. Оценивая автоматизированные системы управления (АСУ), мы говорим, что она должна выполнять требуемые функции (задания) в заданных режимах и воздействиях окружающей среды. Таким образом, теория надежности охватывает весьма широкий круг вопросов, связанных с решением большого количества технических задач от их постановки, т.е. разработки условий и требований, предъявляемых к проектируемым системам, до создания этих систем, организации их эксплуатации и обслуживания [5]. В частности, теория надежности изучает закономерности возникновения отказов технических устройств, а также причин их возникновения.

Появление отказа зависит от большого числа случайных факторов, его трудно исследовать и предсказать, что требует специального изучения этого явления. Время возникновения отказа или время работы системы между отказами представляет собой случайные величины. Случайность времени отказов может быть также связана со случайными изменениями условий эксплуатации (нестабильностью питающего напряжения; вариациями климатических условий; различием в квалификации обслуживающего персонала), а также изменениями в ходе технологического процесса.

Отказавшая система обычно восстанавливается. Отказы могут возникнуть из-за отказов элементов различного типа, расположенных в различных местах сложной системы. Время их восстановления также является случайной величиной и требует специального изучения. Таким образом появляется такая дисциплина, как теория надежности, которая занимается исследованием закономерностей отказов, изучением места и причин возникновения отказов, оценкой промежутков времени восстановления и работы системы, разработкой мероприятий по повышению надежности. Значительная часть вопросов, связанных с расчетом количественных показателей надежности, обоснованием требований к надежности, носит математический характер и требует применения известных и разработки новых математических приложений. При этом **теория надежности является самостоятельным научным направлением**, а не отдельным разделом теории вероятностей, теории случайных процессов и математической статистики. Она является технической, а не математической дисциплиной, и круг решаемых ею задач не ограничивается вероятностными задачами. Суммируя вышесказанное, можно заключить, что 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.
- исследует связь между показателями эффективности и надежности.

Говоря о надежности автоматизированных системах управления, нужно иметь в виду, что это многофункциональная система. Из-за внешних возмущений система может находиться в различных состояниях, но она должна обеспечивать выполнение возложенных на нее функций. Однако в каждом из этих состояний качество выполняемых функций может быть не одинаковым. Например, чем больше отклонение выходных параметров, характеризующих выполняемую функцию от заданных, тем менее качественно работает система, т.е. система менее эффективна. При выходе технологического параметра за установленные пределы можно говорить, что система не выполняет свои функции, т.е. работает ненадежно. Таким образом, надежность является одним из основных параметров качества системы.

Качество системы есть совокупность свойств, определяющих степень пригодности ее для практического применения в соответствии со назначением.

Так или иначе задача может быть решена путем выбора функции эффективности системы. Если качество автоматизированной системы достаточно характеризуется надежностью выполнения ее функций в различных состояниях, то надежность является одной из оценок эффективности АСУ.

На рисунке 1 представлена схема, показывающая взаимосвязь этих показателей.



Рис. 1. Эффективность системы

Традиционно, с точки зрения теории надежности, все современные автоматизированные системы управления можно условно разделить на системы малого масштаба и системы большого масштаба.

Системы малого масштаба предназначены для управления локальными объектами и процессами. Они обычно обладают небольшим 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 разбросанные объекты. Система в целом может быть представлена рядом более простых подсистем и элементов с целью оценки и расчета показателей надежности.

Важным моментом при оценке надежности систем управления является необходимость учета роли человека-оператора. Это требует специального рассмотрения при проектировании и создании АСУ сложными и ответственными технологическими объектами.

1.2. Надежность. Что такое надежность

Объектами рассмотрения с точки зрения изучения надежности автоматизированных систем управления (АСУ) могут быть аппаратные средства, программное обеспечение, сооружения или их комбинации. Объект может включать персонал (ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения»).

Предметом исследования АСУ с точки зрения надежности могут быть: сборочная единица, деталь, компонент, элемент, устройство, оборудование, изделие или в общем случае собственно автоматизированная система.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования [7].

Границ понятия «надежность объекта» не изменяет следующее определение: **надежность объекта** – свойство объекта сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Это определение применяется, когда параметрическое описание объекта нецелесообразно (например, для простейших объектов, работоспособность которых характеризуется по типу «да – нет») или невозможно (например, для систем «машина–оператор»), т. е. таких систем, свойства которых могут не всегда быть охарактеризованы количественно).

К параметрам, характеризующим способность выполнять требуемые функции, относят кинематические и динамические параметры, показатели конструкционной прочности, показатели точности функционирования,

производительности и т. п. С течением времени значения этих параметров могут изменяться.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя:

- **безотказность;**
- **долговечность;**
- **ремонтпригодность;**
- **сохраняемость**
- или определенные сочетания этих свойств (например, для неремонтируемых объектов одним из важнейших свойств является безотказность).

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

Следует подчеркнуть принципиальное понятие «**надежность объекта**», приведенного в ГОСТ Р 27.102–2021: **характеризует свойство объекта**, а не возможность выполнения задания при его участии. Надежность объекта не зависит от готовности, восстанавливаемости, обеспеченности техническим обслуживанием и т. п.

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 поддержания регулируемого параметра, качество переходного процесса**, вид частотной характеристики и т.д., что важно для автоматизированных систем управления.

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, прошедшая испытания до начала эксплуатации и правильно эксплуатируемая система в течение всего времени эксплуатации должна работать без каких-либо остановок, кроме тех, что предусмотрены в плане, или остановок, вызванных организационными вопросами.

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

Важным параметром системы является и ее живучесть, как было показано на рисунке 1.

Под **живучестью** понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Иногда живучесть определяется свойством объекта сохранять работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойством объекта сохранять работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых

элементов. 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.

Как отмечалось выше, особое положение надежности среди показателей качества системы объясняется тем, что она во многом определяет и эффективность средств, вложенных в ее создание. Надежность в отличие от других критериев качества трудно оценивать, ее невозможно быстро рассчитать и сопоставить с требованиями нормативно-технической документации, что требует особого внимания к этому вопросу.

1.3. Проблемы надежности

Развитие современной техники, расширение круга задач, возложенных на автоматизированные системы управления, а также высокие требования к точности, помехозащищенности, быстродействию АСУ требуют их высокой надежности. Ненадежность системы приводит к большим экономическим потерям, неоправданно высокой стоимости эксплуатации оборудования. Стоимость эксплуатации такого оборудования в течение одного года может превышать стоимость самого оборудования. Таким образом, возникновение **проблем надежности** автоматизированных систем управления в настоящее время обусловлено усложнением технических объектов, повышением ответственности функций, выполняемых АСУ (так называемой ценой отказа), ростом сложности аппаратуры, отставанием качества элементов от их количественного применения. Рассмотрим проблемы по обеспечению надежности, связанные с усложнением технических объектов.

Во-первых, наблюдается тенденция функционально-структурного усложнения технических объектов, перехода к качественно новым технологиям, обеспечивающим повышение производительности, быстродействия, точности и другие свойства, улучшающие технологический процесс. Объективной «платой» за такое совершенствование является возрастание структурной сложности объекта. Практика проектирования показывает, что темпы роста сложности объекта находятся в противоречии с требованиями по их надежной работе даже в случае применения самой современной элементной базы. Дело не только в увеличении количества компонентов. Сложность систем повышается и за счет развития многофункциональности и объединения традиционных методов и техники с методами и техникой управляющих комплексов, на которые возлагаются функции обработки и анализа данных для принятия управленческих решений по работе объекта в целом.

Вторая проблема связана с необходимостью учета возможного влияния на систему 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 подсистем и элементов системы. Этот рост требует повышения их качества. Как показывает практика, увеличение надежности элементов резко отстает от темпов роста сложности самих систем.

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.

Пятая проблема – надежность программного обеспечения, включающая способность к восстановлению, устойчивость к отказам, проблема защиты от несанкционированного доступа. В настоящее время особо стоит вопрос с защищенностью программного обеспечения.

Выполнение современной системой автоматизированного управления своих функций в значительной мере зависит от полного или частичного исключения из процесса управления **человека-оператора**. Исключение оператора было вызвано либо скоротечностью процессов, связанных с работой системы, либо ограниченностью физических возможностей человека (например, агрессивная среда в химических процессах). В настоящее время это также обусловлено автоматизацией процессов управления предприятием в целом, где также необходимо учитывать роль и функции человека.

Таким образом вопросы повышения надежности являются важной экономической проблемой. Эксплуатация сложного и ненадежного оборудования требует больших материальных затрат, требует высококвалифицированного обслуживающего персонала. Очевидно, что чем сложнее АСУ, тем труднее обеспечить эксплуатационное обслуживание, тем больше система подвержена расстройке и разрегулировке, тем вероятнее ее выход из строя и выпуск некачественной продукции.

1.4. Повышение надежности

Рассмотрим возможные варианты повышения надежности изучаемых объектов.

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

На стадии проектирования повышение надежности обеспечивается:

- 1) выбором схемы;
- 2) выбором элементов и режимов их работы;
- 3) выбором конструктивного решения системы;
- 4) удобством технического обслуживания и восстановления;
- 5) изучением и учетом недостатков проектирования, выявленных при испытаниях.

Отметим, что хотя процесс проектирования во многом и предопределяет надежность системы, реализация проектных решений в значительной степени связана с организацией производства составляющих систем при их изготовлении.

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

- 1) строгое соблюдение и совершенствование технологии производства отдельных элементов;
- 2) автоматизация производства;
- 3) тренировка элементов и систем;
- 4) настройка и налаживание систем;
- 5) текущий и выходной контроль.

Рассмотрим более подробно отдельные подходы, связанные с повышением надежности на этапе проектирования и изготовления.

1. Наиболее рациональными способами повышения надежности на стадии проектирования являются **включение схемных решений резервирования и использование систем встроенного автоматического контроля**, что сокращает время устранения неисправностей и дает возможность прогнозировать отказы. Это также может обеспечить автоматическое включение резервных элементов и непрерывную работу оборудования.

2. **Выбор наиболее надежных элементов.** Выбор того или иного типа элемента должен быть связан с анализом требований к надежности системы в целом (может оказаться, что предъявляемые требования таковы, что при данном числе элементов и при данных условиях работы системы их можно обеспечить, выбирая не самые надежные, но с меньшей себестоимостью 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, и др. [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 используемых 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.

К мерам текущего и выходного контроля относятся также испытания опытных образцов. Целью испытаний опытных образцов является выявление слабых с точки зрения надежности элементов системы, недостаточная надежность которых обусловлена ошибками проектирования.

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 точной измерительной аппаратуры;
- обеспечен свободный доступ к элементам системы, исключая повреждение других элементов при замене отказавших;
- простота операций при настройке и регулировке системы.

ГЛАВА 2. ТЕРМИНЫ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

2.1. Состояние объекта с точки зрения надежности и безотказности

Техническое состояние объекта можно охарактеризовать совокупностью значений параметров, описывающих состояние объекта, а также качественных признаков, для которых не применяют количественные оценки. Номенклатуру этих параметров, а также допустимые пределы их изменений устанавливают в нормативной и технической документации на объект. С точки зрения надежности объект может находиться в следующих состояниях:

Исправное состояние (исправность): состояние объекта, в котором *все параметры объекта соответствуют всем требованиям*, установленным в документации на этот объект.

Неисправное состояние (неисправность): состояние объекта, в котором *хотя бы один параметр объекта не соответствует хотя бы одному из требований*, установленных в документации на этот объект.

Работоспособное состояние: состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих *его способность выполнять заданные функции*, соответствуют требованиям нормативной и технической документации.

Неработоспособное состояние: состояние объекта, в котором *значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции*, не соответствует требованиям документации на этот объект.

Исправный объект всегда работоспособен, неисправный объект может быть как работоспособным, так и неработоспособным. Работоспособный объект может быть исправен и неисправен, неработоспособный объект всегда неисправен.

Следует понимать, что работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям документации, выполнение которых обеспечивает возможное применение объекта по назначению. Работоспособный объект может быть неисправным, например, если он «потерял» свой внешний вид, не удовлетворяет эстетическим требованиям, причем ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его применению по назначению.

Состояние готовности (объекта): состояние неработающего работоспособного объекта, в котором объект может выполнять требуемые функции в заданных условиях применения при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Дополнительно вводится понятие «**рабочее состояние**», как состояние объекта, в котором он выполняет хотя бы одну требуемую функцию. **Нерабочее состояние:** состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций.

Предельное состояние: состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния. Предельное состояние может возникнуть как в работе внутри процессов, так и во внешнем воздействии на объект в процессе его функционирования. Критерием предельного состояния считают признак или совокупность признаков, установленных в документации, появление которых свидетельствует о возникновении предельного состояния объекта.

2.2. Отказы

Переход объекта из одного состояния в другое обычно происходит вследствие повреждения или отказа.

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, после появления которого характеристики системы выходят за допустимые пределы. *Это 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 или настроек параметров для АСУ, из-за выхода параметров элементов за допустимые пределы и т. п.

Формулировка понятия, что такое отказ, для конкретного технического объекта является в известной мере одной из субъективных и важнейших задач при расчете надежности.

Отказ может быть полным или частичным. **Полный отказ** характеризуется переходом объекта в неработоспособное состояние. **Частичный отказ** характеризуется переходом объекта в частично неработоспособное состояние.

Каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным в документации, называется **дефектом**.

Нарушение исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния – это **повреждение**.

Дефекты и повреждения иногда называют второстепенными неисправностями. Исходя из этого можно дать следующие определения дефектам и неполадкам.

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

Неполадками называются неисправности в работе системы, не оказывающие влияния на выполнение ею 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.

Дефект и (или) повреждение могут служить причиной возникновения частичного или полного отказа объекта. Наличие дефекта или неисправности приводит объект в неисправное состояние.

Для классификации отказов вводят понятия «вид отказа» и «критерии отказа».

Вид отказа – единица классификации отказов на основе установленных критериев: особенностей, причин, последствий отказа, способностей выполнять определенные функции, которые утрачены в результате отказа.

Характерным примером является сбой при выполнении компьютерной программы, устраняемый повторным запуском программы с места останова.

Критерии отказа – это признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в документации, где под признаком отказа понимается изменение объекта, обусловленное возникновением отказа и которое можно наблюдать.

Рассмотрим более подробно возможность классификации отказов по отдельным признакам.

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

Систематический отказ, как правило, вызванный определенной причиной, которая может быть устранена только модификацией проекта или производственного процесса, изменением правил эксплуатации. 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 аппаратура усовершенствуется и подобные отказы не возникают.

Отказы, как случайные события, могут быть независимыми и зависимыми. Отказ какого-либо элемента в системе, не вызванный возникновением других отказов, называется **независимым**. Отказ, вызванный возникновением других отказов, называется **зависимым**.

В большинстве случаев механические или физические повреждения элементов наступают мгновенно, скачкообразно 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*.

Термины «внезапный отказ» и «постепенный отказ» позволяют разделять отказы на две категории в зависимости от возможности прогнозирования момента возникновения отказа. В отличие от внезапного отказа появлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого удастся предупредить появление отказа или принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий, но четкой границы между внезапными и постепенными отказами, однако, провести не удастся. Механические, физические и химические процессы, которые составляют причины отказов, как правило, протекают во времени достаточно медленно. Так, усталостная трещина в стенке трубопровода или сосуда давления, зародившаяся из дефекта, медленно растет в процессе эксплуатации; этот рост в принципе может быть прослежен средствами неразрушающего контроля. Однако собственно отказ (наступление течи) происходит внезапно. Если по каким-либо причинам своевременное обнаружение сквозной трещины оказалось невозможным, то отказ придется признать внезапным.

Можно также выделить *окончательные, сбои и перемежающиеся отказы*.

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

Сбой: самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора, либо может самопроизвольно исчезать без вмешательства обслуживающего персонала после устранения вызвавшей их причины.

Перемежающийся отказ: многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера. Перемежающийся отказ продолжается короткое время, затем система самовосстанавливается и работает надежно.

По причинам возникновения отказов можно выделить: *конструктивные, производственные, эксплуатационные и деградационные*.

Конструктивный отказ: отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством конструкции или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования.

Производственный отказ: отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления объекта или его ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии.

Эксплуатационный отказ: отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации объекта.

Деградационный отказ: отказ, обусловленный естественными процессами старения, износа, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации объекта.

При анализе надежности объекта можно также выделить **ранние отказы**, когда проявляется влияние дефектов, не обнаруженных в процессе изготовления, испытаний и (или) приемочного контроля, и **поздние**, деградационные отказы. Последние происходят на заключительной стадии эксплуатации объекта, когда вследствие естественных процессов старения, изнашивания, коррозии и т. п. объект или его составные части приближаются к предельному состоянию по условиям физического износа. В соответствии с определением деградационный отказ может иметь место только при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации объекта, возникновение деградационных отказов всегда происходит за пределами планируемого полного или межремонтного срока службы (ресурса). Возможность продолжения эксплуатации по истечении планового срока службы (ресурса), с учетом возможности появления деградационных отказов, обеспечивается расчетом на долговечность с учетом физики процессов, приводящих к деградационным отказам, а также надлежащей системы технического обслуживания и ремонта можно практически исключить возникновение ранних отказов, если до передачи объекта в эксплуатацию провести приработку, обкатку, технологический прогон и т. п. При этом соответственно может измениться цена объекта.

Отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния, – **ресурсный отказ**.

Явный отказ: отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения.

Скрытый отказ: отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования.

По физическим признакам проявления различают отказы типа: **обрыв, перегрузка, уход параметров за пределы установленных норм**. 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.

По объему и характеру восстановления системных повреждений можно выделить расстройки, повреждения и аварии, которые 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.

В таблице 1 представлена классификация отказов по вышеупомянутым признакам.

Таблица 1 – Классификация отказов

№	Классификационные признаки	Виды отказов
1	По возможности прогнозирования места возникновения	Случайные Систематические
2	По взаимосвязи между собой	Независимые Зависимые
3	По характеру процесса возникновения	Внезапные Постепенные
4	По причинам возникновения	Конструктивные Производственные Эксплуатационные Деградационные
5	По времени существования	Окончательные Сбой Перебегающие
6	По физическим признакам	Обрыв Перегрузка Уход параметров за пределы установленных норм ТУ
7	По объему и характеру восстановления	Расстройки Повреждения Аварии
8	По способности к проявлению	Явный Скрытый

В таблице 2 представлены основные причины, из-за которых могут возникнуть отказы, связанные с различными стадиями жизненного цикла объекта (проектирование, производство, эксплуатация). Приведенные данные являются ориентировочными и не могут отображать статистические зависимости для всех эксплуатируемых систем, но в общем случае дают некоторое представление о том, какие факторы влияют на надежность и их

ранжирование в процентном отношении. На рисунке 2 представлена соответствующая диаграмма.

Таблица 2 – Причины отказов системы

Этапы	Причины отказов	Число отказов, %
Проектирование	Схемные 1. Недостатки схемы 2. Неправильный выбор электрических величин 3. Неправильное применение элементов	11 10 12
	Конструктивные 1. Неправильный материал 2. Неправильный выбор механической конструкции	5 5
Производство	1. Изготовление не в соответствии с техническими условиями 2. Недоброкачественное сырье и полуфабрикаты	18 2
	1. Климатические условия и механические нагрузки, несоответствующие заданным 2. Неправильное обслуживание и неправильный режим эксплуатации	12 18
Причины, которые могут быть отнесены к любому из предыдущих этапов	Износ, старение и т. д.	7

Важно понять, что основы надежности закладываются на этапах проектирования и изготовления системы и поддерживаются в процессе эксплуатации.

Еще один важный аспект, связанный с надежностью. Расходы на техническое обслуживание и ремонт могут составлять до 50 % суммарного объема вложений в изготовление аппаратуры, что требует особого изучения этого вопроса и систематической работы по учету отказов и причин их возникновения.

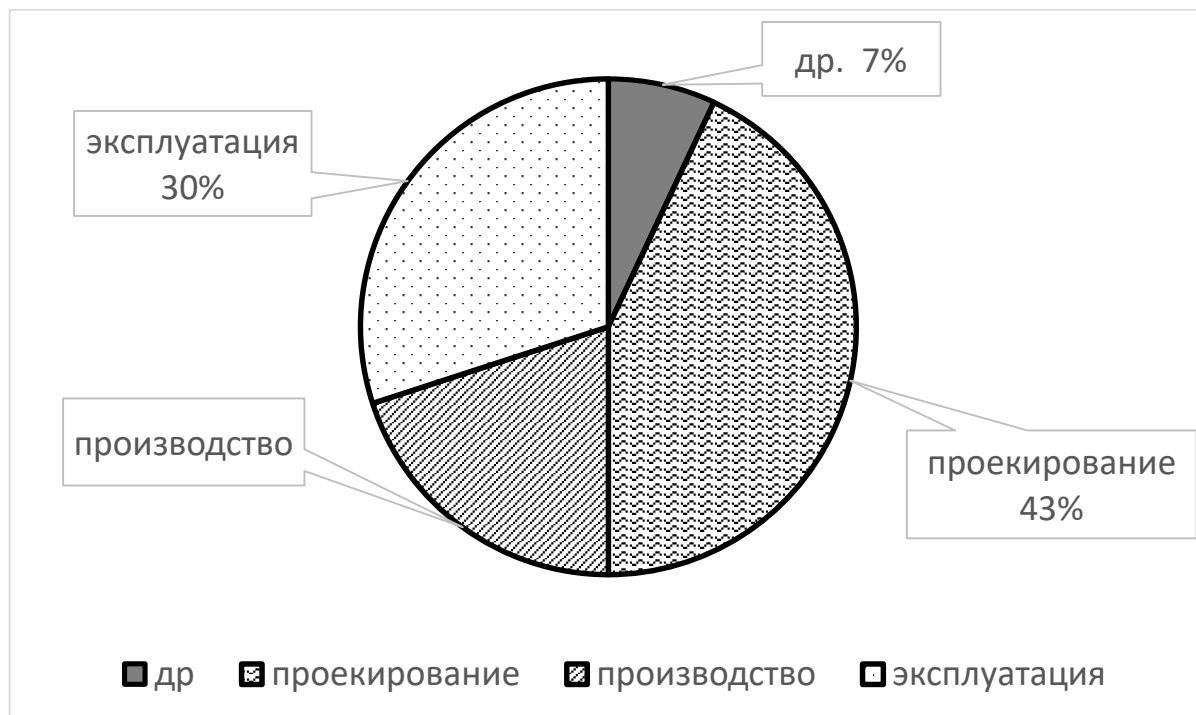


Рис. 2. Диаграмма распределения отказов

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 стимулирования правильности записей. 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, восстановлении, 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 исследуемого объекта. Сбор сведений об отказах является ответственным этапом при исследовании надежности элементов и систем и нахождения причины отказов. Вся информация об отказах должна храниться в базе компьютеров. При накоплении данных вычисляются и уточняются значения показателей надежности, а также планируются мероприятия по техническому обслуживанию (ТО).

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.

Получение и систематизация сведений об отказах в процессе эксплуатации является необходимым и крайне важным моментом для оценки надежности и предотвращения отказов.

ГЛАВА 3. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ

3.1. Система с точки зрения надежности

При рассмотрении и расчете надежности очень важно понимать, что такое система, подсистема и элементы.

Можно сказать, что *система* с точки зрения надежности – это объект, представляющий собой множество взаимосвязанных элементов, рассматриваемых в определенном контексте как единое целое, отделенное от окружающей среды. Для системы обычно определяют конкретную цель, например, выполнение требуемой функции. На работу системы может влиять окружающая среда.

Подсистема – часть системы, представляющая собой систему.

Элемент – это объект рассмотрения, у которого отсутствуют или в рамках данного исследования не рассматривают составные части. Система, применительно к оценке надежности АСУ, имеет весьма широкий обобщающий смысл и включает в себя такие элементы, как ячейка, узел (блок), прибор, установка и др.

Ячейка – отдельная 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.

Как уже отмечалось, объект исследования с точки зрения надежности может включать в себя аппаратные средства, программное обеспечение, персонал или их комбинации. Система, как совокупность взаимосвязанных элементов и служащая для выполнения определенной задачи, может быть разбита на любое число элементов, что необходимо для оценки ее надежности. Эта *декомпозиция* должна останавливаться на уровне таких функциональных элементов, для которых могут быть определены основные показатели надежности.

Рассмотрим возможную классификацию систем (табл. 3). Необходимые определения были приведены выше, а также будут рассмотрены в главе 5.

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

Различают следующие состояния системы точки зрения надежности:

- **работоспособное** (РБС) состояние системы, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации;
- **неработоспособное** (НРБС) состояние системы, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект;
- **предельное** – состояние системы, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Динамика возможных состояний системы представлена на рисунке 3.

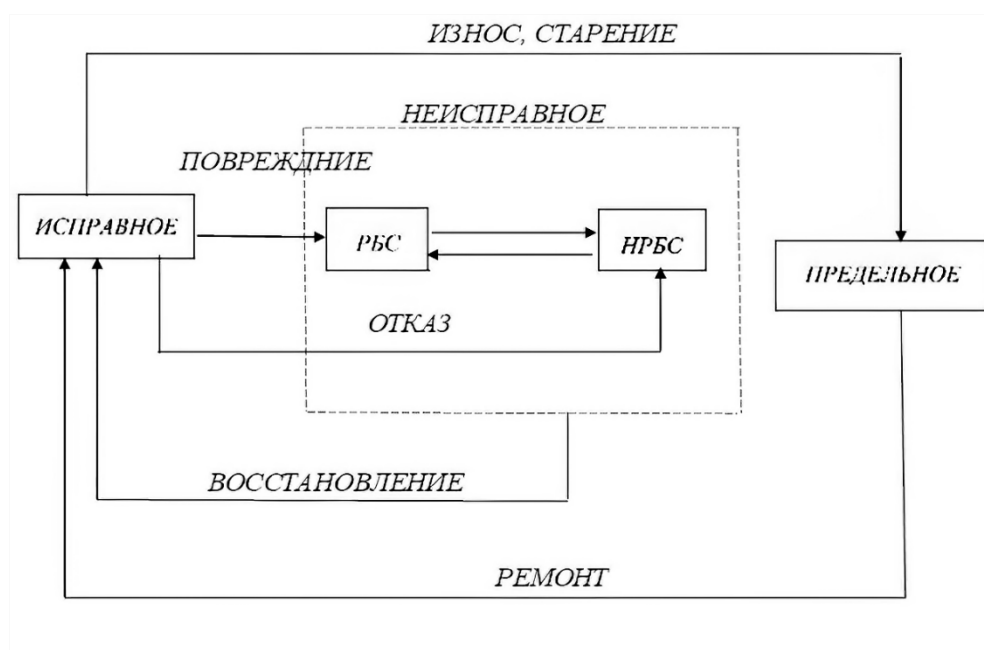


Рис. 3. Динамика возможных состояний системы

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: работоспособном и неработоспособном.

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, как в автоматизированных системах управления. Сложная система состоит из простых систем, подсистем, устройств, предназначенных для выполнения некоторой эксплуатационной задачи. Когда мы имеем дело со сложной системой, понятие «надежность» приобретает особый характер. Это связано с тем, что элементы сложной системы могут находиться в большом числе состояний, каждое из которых характеризуется определенной надежностью.

3.2. Разновидности надежности

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

Под **номинальной надежностью** понимается надежность, закладываемая в результате проектирования и проверяемая в ходе испытаний опытных образцов. Это связано с понятием нормирования надежности.

Нормирование надежности – это установление в нормативной и технической документации количественных и качественных требований к надежности объекта. Это включает в себя выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности; установление и технико-экономическое обоснование значений показателей надежности системы и отдельных элементов, установление критериев отказов, повреждений и предельных состояний; задание требований к методам контроля надежности на всех этапах жизненного цикла объекта.

Под **технической надежностью** понимается надежность, которая формируется с учетом технологических условий производственных процессов и оценивается по результатам контрольных испытаний партий изделий.

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.

Номинальная надежность должна быть больше надежности технической, а та, в свою очередь, должна быть больше эксплуатационной.

Эксплуатационная надежность должна учитывать наличие обратных информационно-управляющих связей в системе управления качеством.

3.3. Элемент. Виды соединения элементов

При расчете надежности система разбивается на отдельные элементы.

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.

Можно выделить **типовые и специальные элементы**.

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).

Очень важно с точки зрения расчета показателей надежности определить вид соединения элементов системы. Это связано с декомпозицией системы и составлением блок-схемы или **структурной схемы расчета** надежности, где определяется влияние каждого из элементов на надежность системы в целом. Различают следующие виды соединений элементов: **последовательное, параллельное и смешанное** (см. рис. 4).

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 в электрической схеме на блок-схеме надежности представляются соединенными последовательно, так как пробой любого из них вызывает отказ прибора (рис. 4а).

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. 4б).

Смешанное соединение элементов представляет собой сочетание первых двух (рис. 4в).

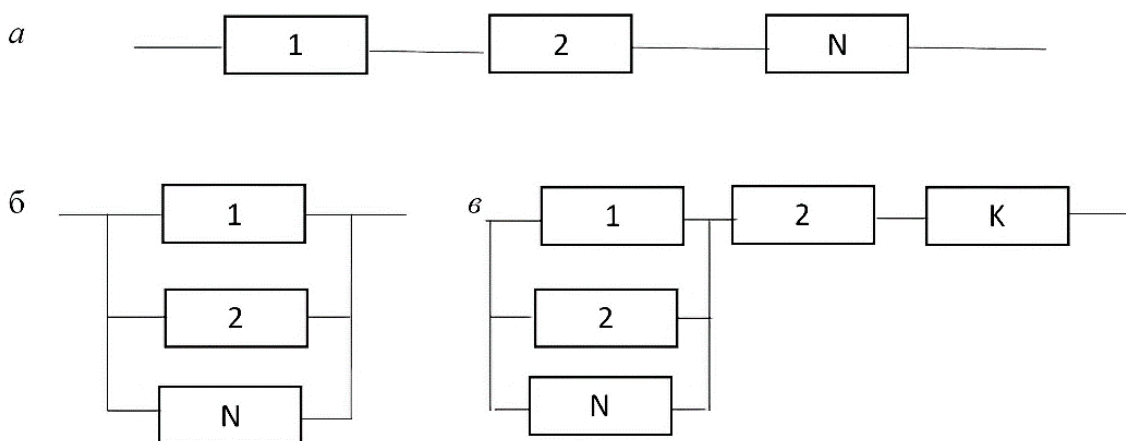


Рис. 4. Виды соединений элементов: *a* – последовательное; *б* – параллельное; *в* – смешанное

3.4. Понятие элемента расчета надежности

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

Термин «элемент расчета надежности» имеет большое практическое значение при выполнении инженерных расчетов надежности сложных систем. Расчет надежности системы ведется по известным количественным характеристикам надежности, входящих в нее элементов.

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 определяются 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 системе в целом, а также изучение условий 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 приступать к расчету надежности, необходимо четко сформулировать, что следует понимать под отказом системы, а затем уже выбирать число элементов, которое 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, о чем будет сказано ниже.

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.

3.5. Проектная оценка надежности АСУ

Проектная оценка надежности системы проводится на этапе разработки АСУТП в соответствии с ГОСТом Р 59795–2021 «Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Требования к содержанию документов».

Обеспечение требуемого уровня надежности АСУ необходимо связать со следующими особенностями:

- Каждая АСУ является многофункциональной системой, функции которой имеют различную значимость (влияние) и, соответственно, характеризуются различными уровнями требований к надежности их выполнения;
- Во многих АСУ возможно возникновение некоторых исключительных (аварийных) ситуаций, представляющих сочетание отказов или ошибок функционирования системы;
- Работоспособность АСУ определяется различными видами ее обеспечения и персоналом АСУ, которые могут влиять в той или иной степени на уровень надежности АСУ.

При этом необходимо руководствоваться ГОСТом 24.701–86 «Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения» (Единая система стандартов автоматизированных систем управления).

Как правило, количественное описание, анализ, оценка и обеспечение надежности проводится *по каждой функции АСУ в отдельности*. В необходимых случаях используют также анализ возможности возникновения в системе *аварийных ситуаций*, которые могут привести к значительным техническим, экономическим или социальным потерям вследствие аварии объекта управления (или автоматизированного комплекса в целом).

Таким образом, в качестве *показателей надежности АСУ* используют показатели, характеризующие: надежность реализации функций систем и опасность возникновения в системе аварийных ситуаций.

Основными единичными показателями безопасности принимаются:

- средняя наработка системы на отказ при выполнении *i*-ой функции;
- вероятность безотказного выполнения системой *i*-ой функции.

Количественным показателем, характеризующим ремонтпригодность, используют:

- среднее время восстановления способности системы к выполнению *i*-ой функции после отказа;
- вероятность восстановления в течение заданного времени, способности системы к выполнению *i*-ой функции после отказа.

Комплексным показателем безотказности и ремонтпригодности является *коэффициент готовности* системы к выполнению *i*-ой функции (K_T).

При оформлении документации необходимо руководствоваться ГОСТами серии «Надежность в технике», в частности:

- ГОСТ 34.201–89 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем»;
- ГОСТ Р 27.010–2019 (МЭК 61703:2016) «Математические выражения для показателей безотказности, готовности, ремонтпригодности»;
- ГОСТ Р 27.015–2019 (МЭК 60300-3:2009) «Управление надежностью. Руководство по проектированию надежности систем»;
- ГОСТ Р 27.012–2019 «Анализ опасности и работоспособности (HAZOP)».

Пример в части использования ГОСТов при разработке проектной документации АСУ в части обеспечения надежности представлен на рисунке 5.

ГОСТ 34.201–89

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ			
Комплекс стандартов на автоматизированные системы			
ВИДЫ, КОМПЛЕКТНОСТЬ И ОБОЗНАЧЕНИЕ ДОКУМЕНТОВ ПРИ СОЗДАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ			
Стадия создания	Наименование документа	Код документа	Часть проекта
ТП, РД	Проектная оценка надежности системы	Б1	ОР

Рис. 5. Оформление требований к документам

ГОСТ Р 59795–2021 «Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов»

Проектная оценка надежности системы должна содержать следующие разделы (пункт 5.10 из ГОСТ):

- 1) введение;
- 2) исходные данные;
- 3) методику расчета;
- 4) расчет показателей надежности;
- 5) анализ результатов расчета.

В настоящее время подходы, связанные с оценкой и расчетом надежности, регламентированы ГОСТами [9 – 27] и будут подробно рассмотрены в части 2 учебного пособия.

ГЛАВА 4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

4.1. Избыточность

Избыточность – есть превышение веса, габаритов или возможностей отдельных элементов системы по сравнению с минимально необходимыми для заданной структуры. Она связана с обеспечением заданной надежности. Т. е. дополнительные средства и возможности сверх минимально 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 приходится выбирать наиболее качественные элементы, обладающие высокой надежностью, облегчать режимы работы элементов, либо вводить резервирование, что приводит к некоторой избыточности системы по указанным характеристикам.

В соответствии с ГОСТом [7] **резервирование** – это способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и/или возможностей сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций.

В зависимости от вида избыточности различают:

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, безынерционности 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.

4.2. Методы резервирования

Резервирование как способ повышения надежности путем включения резерва, предусмотренного при разработке конструкции или в процессе ее эксплуатации, является одним из основных способов повышения надежности системы.

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 таблице 4 и в таблице 5.

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

Выделяют также:

- резервирование системы в целом (резервирование общее) (рис. 6);
- резервирование системы по элементам (резервирование отдельное) (рис. 7).

Таблица 4 – Классификация резервирования 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

Таблица 5 – Классификация резервирования

Резервирование							
Целая кратность				Дробная кратность			
общее		раздельное		общее		раздельное	
Постоян-ное	Замеще-нием	Постоян-ное	Замеще-нием	Постоян-ное	Замеще-нием	Постоян-ное	Замеще-нием
	Нагруже-нный резерв		Нагруже-нный резерв		Нагруже-нный резерв		Нагруже-нный резерв
	Облегчё-нный резерв		Облегчё-нный резерв		Облегчё-нный резерв		Облегчё-нный резерв
	Ненагру-женный резерв		Ненагру-женный резерв		Ненагру-женный резерв		Ненагру-женный резерв

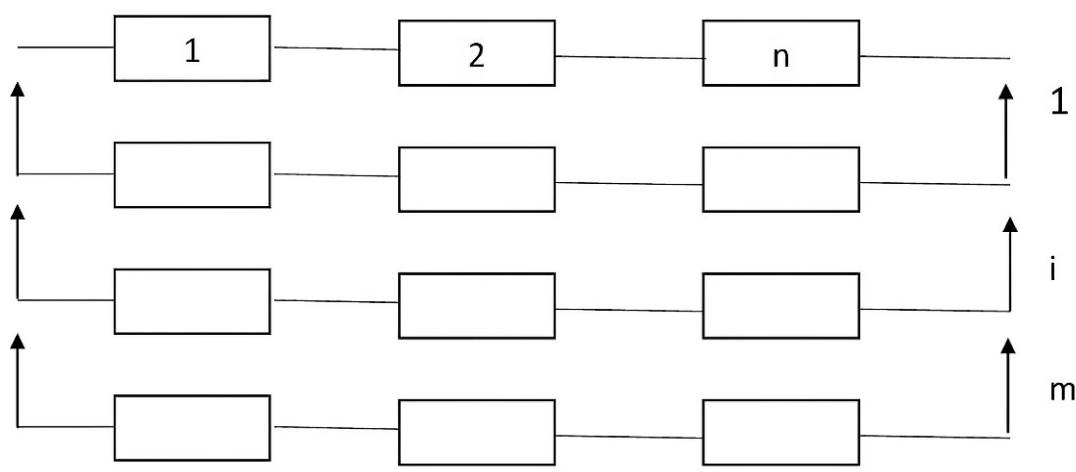


Рис. 6. Схема общего резервирования

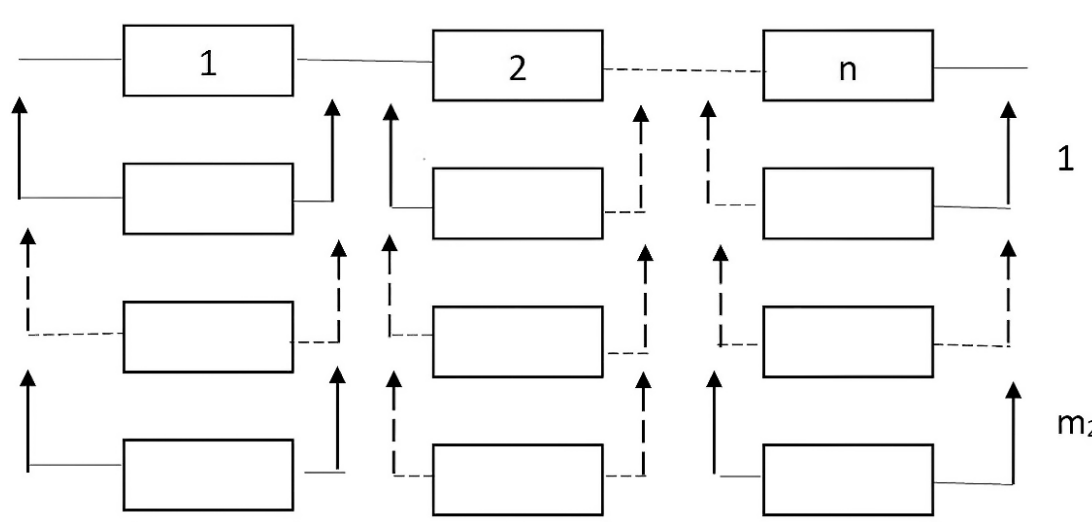


Рис. 7. Схема раздельного резервирования

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 $t=1/4$ (для обеспечения надежной работы системы электроснабжения достаточно иметь четыре генератора при одном резервном).

Резервирование, кратность которого равна единице и имеет 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. 8, а).

Резервирование замещением – это такое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного (рис. 8, б).

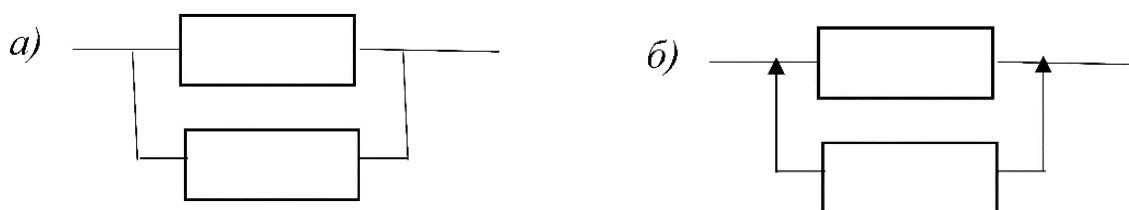


Рис. 8. Резервирование: а – постоянное; б – замещением

Достоинства резервирования при постоянном включении резерва:

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

Недостатки 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. 9).

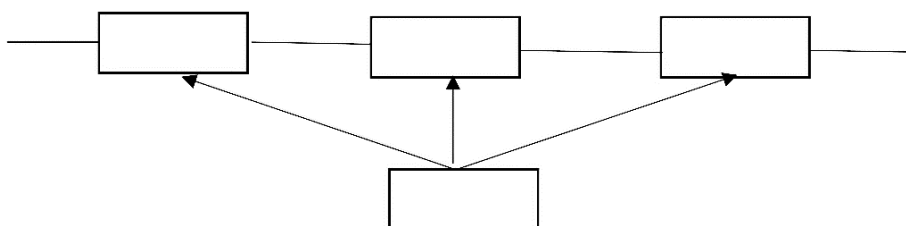


Рис. 9. Скользящее резервирование

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. Непогруженный 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 вместо 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, то 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. 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.

При **толерантном резервировании** системы для обнаружения устранения собственных неисправностей не требуется вмешательство человека. Например, толерантность бортовых вычислительных систем достигается при одновременном использовании трех форм избыточности: аппаратной, программной и временной.

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 удастся осуществить одинаковый контроль основного и резервного элементов. Все эти аспекты оказывают существенное влияние на эффективность резервирования.

Все вышесказанное можно объединить еще в одну схему, где приведены основные общие признаки и виды резервирования (рис. 10.).

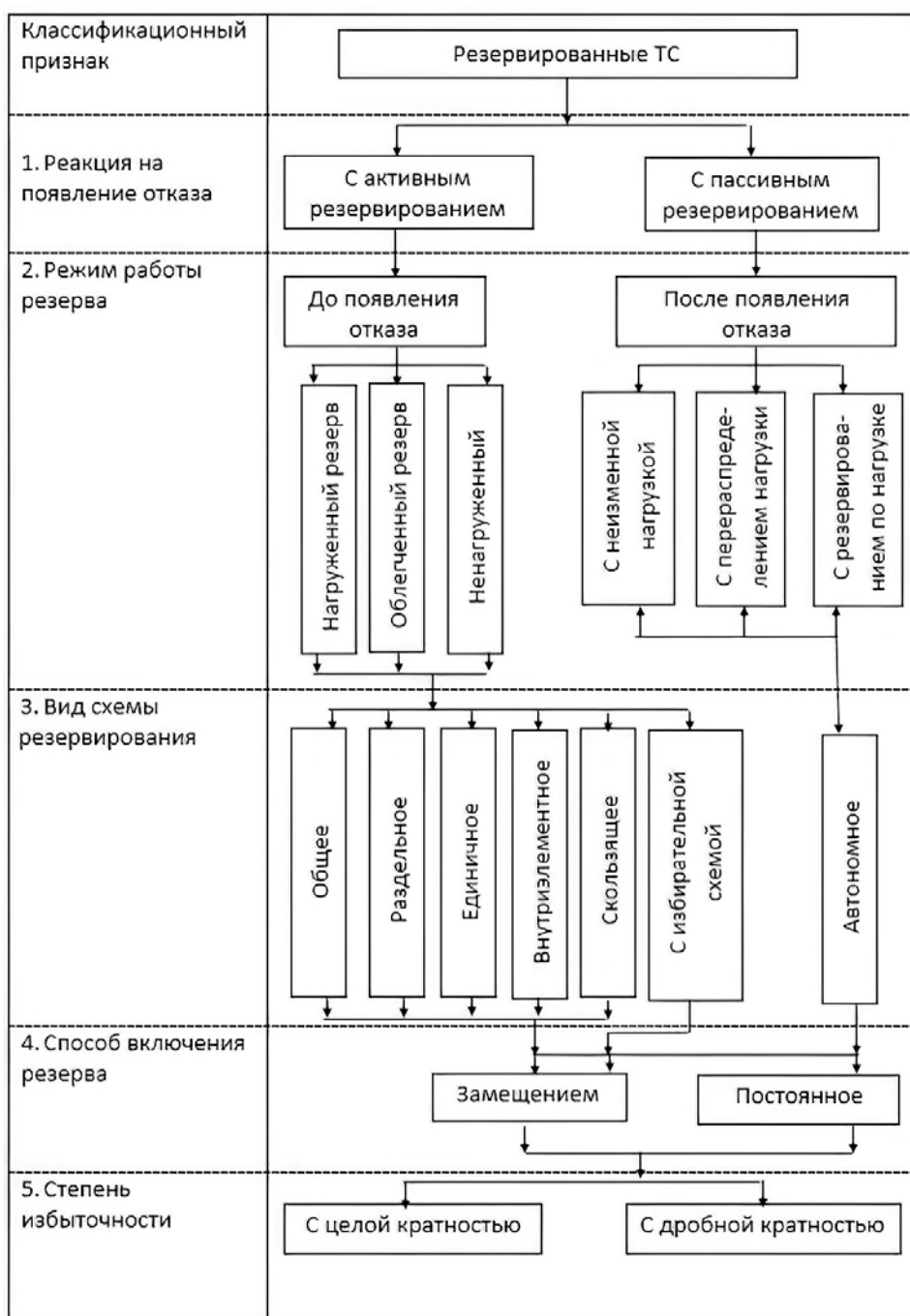


Рис. 10. Классификация резервирования по признакам и виду резервирования

Анализ различных методов резервирования позволяет сформулировать основные свойства, которые приобретает техническая система в результате резервирования.

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 нерезервированной 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 5. РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ. СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА

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 застать 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.

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.

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

5.1. Техническое обслуживание

Условия работы многих автоматизированных систем управления связаны с большими нагрузками, вибрационными воздействиями, механическим напряжением и коррозионной средой, что значительно сокращает 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, регулировкой, настройкой и т. п. Все это включается в понятие техническое обслуживание (ТО).

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.

Регламентированные проверки осуществляются в соответствие с планом.

Содержание профилактических работ включают чистку аппаратуры, ее узлов и элементов: механических, смазочных, периодических и сезонных работ.

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 некоторое постоянное время. 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.

Плановое ТО (регламентированное) осуществляется в соответствии с требованиями документов.

Внеплановое ТО – техническое обслуживание, выполнение которого осуществляется по техническому состоянию объекта без предварительного назначения.

С точки зрения ТО объекты делятся на обслуживаемые и необслуживаемые.

Для **обслуживаемых** объектов предусмотрено ТО в соответствии с документацией. Для **необслуживаемых** объектов ТО не предусмотрено.

Различают несколько методов назначения сроков проведения мероприятий по техническому обслуживанию: 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.

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

При техническом обслуживании, наряду с положительным действием, часто имеются нежелательные последствия из-за 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 не наблюдается.

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

5.2. Назначение ремонта

Уже отмечалось выше, что важными с точки зрения надежности являются понятия восстанавливаемого и невозстанавливаемого объекта, где восстановление как процесс или событие, заключающееся в переходе объекта из неработоспособного состояния в работоспособное после отказа.

Восстанавливаемый объект – это объект, восстановление работоспособного состояния которого в рассматриваемой ситуации предусмотрено технической документацией.

Для **невозстанавливаемого объекта** восстановление работоспособного состояния в рассматриваемой ситуации не предусмотрено документацией.

Восстановление включает в себя идентификацию отказа (определение его места и вида), наладку или замену отказываемого элемента, регулирование и контроль технического состояния элементов объекта и заключительные операции, которые обеспечивают работоспособность объекта в целом.

На рисунке 11 представлена классификация объекта с точки зрения его восстановления.



Рис. 11. Классификация объектов с точки зрения восстановления

Перевод объекта из предельного состояния в работоспособное осуществляется при помощи ремонта, при котором происходит восстановление ресурса объекта в целом. В ремонт могут входить разработка, поиск дефектов, замена или восстановление отдельных блоков, деталей, сборных единиц, сборка. Таким образом, **ремонт** – это комплекс технических операций и организационных действий по обеспечению исправного или работоспособного состояния объекта и восстановлению ресурса объекта или его составных частей.

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

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 готовые графики ремонта технологического оборудования, на основании которых составляются квартальные и месячные графики ремонтов по цехам и видам оборудования.

По сложности и объему ППР разделяется на три основных вида (рис. 12):

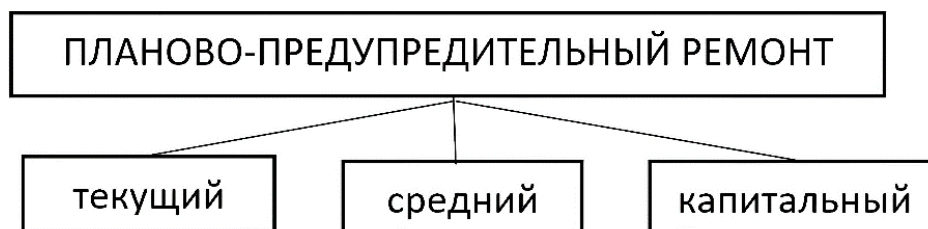


Рис. 12. Виды планово-предупредительного ремонта

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 запланированной 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.

Особое место занимает **аварийный ремонт**. Он 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, применении мер по предупреждению аварий, необходимости в аварийных ремонтах не возникает.

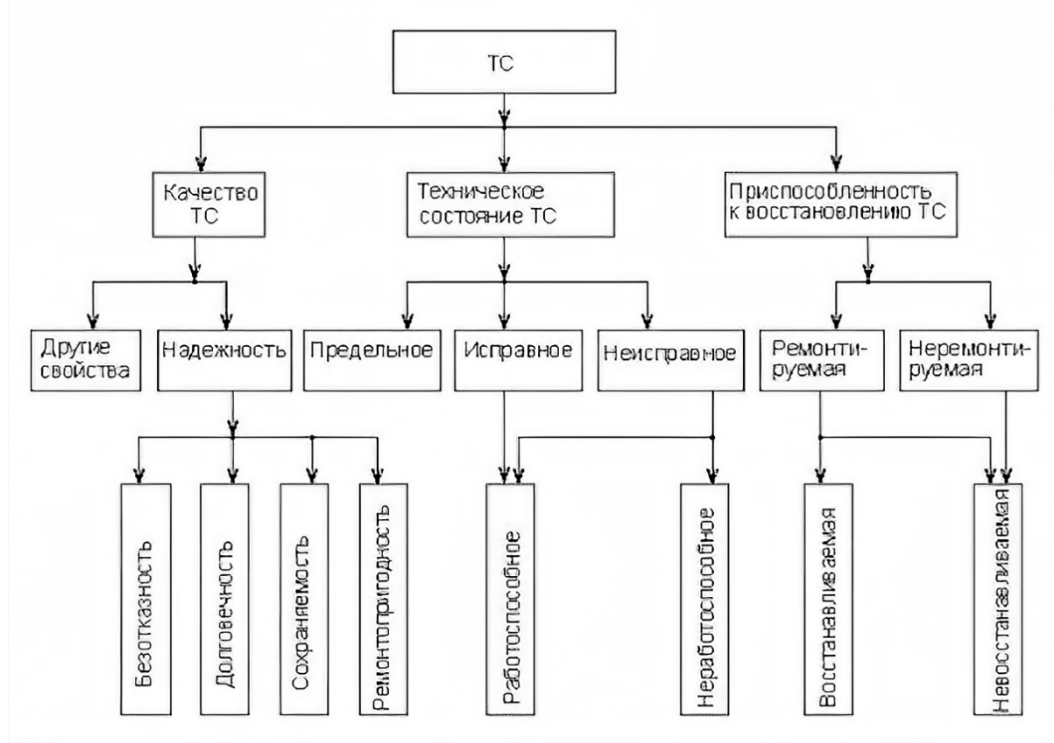


Рис. 13. Основные характеристики технической системы

На рисунке 13 представлены обобщенные характеристики технической системы (ТС) с учетом понятий надежности и возможностей технического обслуживания.

5.3. Запасные части

При эксплуатации системы важную роль играет наличие запасных частей, которые необходимы при отказах и наступлении ремонта, для уменьшения времени простоя оборудования.

Запасная часть (ЗЧ) – составная часть системы (отдельный узел, устройство или элемент), предназначенная для замены изношенных, неисправных или отказавших составных частей системы в целях поддержания или восстановления работоспособности системы. Запасные части объединяют в **комплекты**:

1) одиночный, который предназначен для поддержания в работоспособном состоянии путем проведения технического обслуживания 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 также 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) к запасным частям относятся и эксплуатационные материалы, предназначены для использования при техническом обслуживании и ремонте оборудования. К таким материалам относятся смазки, лаки и др.

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 возможностей 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.

В связи с этим вводится понятие ЗИП – запасные части инструментов, принадлежностей и расходных материалов, необходимых для обеспечения функционирования, технического обслуживания и ремонта объекта. Он формируется в соответствии с требованиями документации, с учетом назначения и особенностей использования объекта.

ГЛАВА 6. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

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.

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

Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованию безопасности, экономичности и эффективности.

Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации объекта. При достижении предельного состояния объект должен быть снят с эксплуатации, направлен в средний или капитальный ремонт, списан, утилизирован или передан для применения не по назначению.

Для неремонтируемых объектов имеет место предельное состояние двух видов:

- первый вид совпадает с неработоспособным состоянием;
- второй вид предельного состояния обусловлен тем, что, начиная с некоторого момента, дальнейшая эксплуатация еще работоспособного объекта недопустима в связи с опасностью или высокими затратами эксплуатации.

Для ремонтируемых объектов выделяют несколько видов предельного состояния. Например, для двух видов предельного состояния требуется отправить объект в средний или капитальный ремонт, т. е. временное прекращение применения объекта по назначению. Третий вид предельного состояния предполагает окончательное прекращение применения объекта по назначению. Как отмечалось выше, критерий предельного состояния каждого вида устанавливается в документах.

Долговечность можно охарактеризовать таким показателем, как срок службы.

Срок службы – это календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации до момента достижения объектом предельного состояния.

Назначенный срок службы – это календарная продолжительность, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния. По истечении назначенного срока службы объекта должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей документацией о списании, ремонте, оценке технического состояния, установления нового назначенного срока службы.

Существует гамма-процентный срок службы – это календарная продолжительность эксплуатации объекта, в течение которой он не достигает предельного состояния с заданной вероятностью, 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, заменяют ее исправной.

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

ГЛАВА 7. СОХРАНЯЕМОСТЬ

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

Свойство сохраняемости может характеризоваться **сроком сохраняемости** – календарной продолжительностью хранения и/или транспортирования объекта, в течение которой значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, остаются в пределах, установленных в документации. По истечении срока сохраняемости объект должен соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленным в документации.

Для характеристики свойства сохраняемости вводят понятие **назначенный срок хранения**.

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

В процессе хранения и транспортирования объекты подвергаются неблагоприятным воздействиям, например, колебаниям температуры, действию влажного воздуха, вибрациям и т. п. 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.

В зависимости от условий и режимов применения объекта требования к сохраняемости устанавливаются по-разному. Для некоторых классов объектов может быть установлено требование того, чтобы после хранения объект находился в таком же состоянии, что и к моменту начала хранения. В реальных условиях происходит ухудшение параметров, характеризующих работоспособность объекта, а также снижается его остаточный ресурс.

В одних случаях достаточно потребовать, чтобы после хранения и (или) транспортирования объект оставался в работоспособном состоянии. В большинстве других случаев требуется, чтобы объект сохранял достаточный запас работоспособности, т. е. обладал достаточной безотказностью после хранения и (или) транспортирования. В тех случаях, когда предусмотрена специальная подготовка объекта к применению по назначению после хранения и (или) транспортирования, требование о сохранении работоспособности заменяется требованием того, чтобы технические параметры объекта, определяющие его безотказность и долговечность, сохранялись в заданных пределах. Очевидно, что все эти случаи охватывает приведенное определение понятия сохраняемости.

Требования к показателям безотказности, долговечности и ремонтпригодности для объекта, подвергнутого длительному хранению, необходимо указывать в техническом задании, и в отдельных случаях они могут быть снижены относительно уровня требований к новому объекту, не находившемуся на хранении.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Половко, А. М. Основы теории надежности [Текст] / А. М. Половко. – М.: Наука, 1964. – 446 с.
2. Калявин, В. П. Основы теории надежности и диагностики [Текст] / В. П. Калявин. – СПб.: Элмор, 1998. – 178 с.
3. Глазунов, Л. Л. Основы теории надежности автоматических систем управления [Текст] / Л. Л. Глазунов, В. П. Грабовецкий, О. В. Щербаков. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
4. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин. – Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2007. – 276 с.
5. Дружинин, Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем [Текст] / Г. В. Дружинин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
6. Иванов, С. И. Основы теории и расчета показателей надежности [Текст] / С. И. Иванов. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2000. – 54 с.
7. ГОСТ 27.101-2021. Надежность в технике. Надежность выполнения задания и управление непрерывностью деятельности. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2022-01-01.
8. Мартынов, А. А., Основы теории надежности и диагностики [Текст] / А. А. Мартынов, Г. А. Долгополов. – Новосибирск: НГАВТ, 1999. – 108 с.
9. ГОСТ Р 27.003-2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Руководство по заданию технических требований к надежности. (IEC 60300-3-4 (2007-09) Dependability management – Part 3-4: Application guide – Guide to the specification of dependability requirements (NEQ) [Текст]. – Введ. 2012-09-01.
10. ГОСТ Р 27.004-2009. Надежность в технике. Модели отказов [Текст]. – Введ. 2010-09-01.
11. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения [Текст]. – Введ. 1997-01-01.
12. ГОСТ Р 27.301-2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Техника анализа безотказности. Основные положения. IEC 60300-3-1 (2003-01) Dependability management – Part 3-1: Application guide – Analysis techniques for dependability – Guide on methodology [Текст]. – Введ. 2012-09-01.
13. ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей [Текст]. – Введ. 2010-09-01.
14. ГОСТ Р 27.201-2011. Надежность в технике. Экспертиза проекта [Текст]. – Введ. 2012-09-01.
15. ГОСТ 27.202-83. Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции [Текст]. – Введ. 1984-07-01.
16. ГОСТ Р 27.202-2012. Надежность в технике. Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла. IEC 60300-3-3 (2004) Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing (NEQ) [Текст]. – Введ. 2013-04-01.

17. ГОСТ 27.203-83. Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности [Текст]. – Введ. 1984–07–01.
18. ГОСТ Р 27.203-2012. Надежность в технике. Управление устареванием [Текст]. – Введ. 2013–04–01.
19. ГОСТ 27.204-83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности [Текст]. – Введ. 1985–01–01.
20. ГОСТ Р 27.012-2019. Надежность в технике. Анализ опасности и работоспособности (HAZOP) [Текст]. – Введ. 2020–07–01.
21. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения [Текст]. – Введ. 1997–01–01.
22. ГОСТ 27.402-95. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Часть 1. Экспоненциальное распределение [Текст]. – Введ. 1997–01–01.
23. ГОСТ 34.201-89 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем [Текст]. – Введ. 1990–01–01.
24. ГОСТ Р 27.010-2019 (МЭК 61703:2016) Математические выражения для показателей безотказности, готовности, ремонтпригодности [Текст]. – Введ. 2019–12–01.
25. ГОСТ Р 27.015-2019 (МЭК 60300-3:2009) Управление надежностью. Руководство по проектированию надежности систем [Текст]. – Введ. 2020–07–01.
26. ГОСТ Р 27.012-2019 Анализ опасности и работоспособности (HAZOP) [Текст]. – Введ. 2020–07–01.
27. ГОСТ Р 59795-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов [Текст]. – Введ. 2022–04–30.

Учебное издание

Сидельников Владимир Иванович

**Диагностика и надежность
автоматизированных систем управления**

Часть 1

Учебное пособие

Редактор и корректор М. Д. Баранова
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2020 г., поз. 88

Подписано к печати 02.05.2023 г.	Формат 60x84/16.	Бумага тип № 1.
Печать офсетная.	Печ.л. 3,3.	Уч.-изд. л. 3,3.
Тираж 30 экз.	Изд. № 88.	Цена «С».
		Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.