

Д.П. Алейников

2025

Надежность и диагностика технологических систем

Учебное пособие



УДК 62
ББК 34
А 458

Рецензент: Лукьянов Анатолий Валерианович, д.т.н. профессор, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение» Иркутского государственного университета путей сообщения.

Алейников, Дмитрий Павлович

А 458 Надежность и диагностика технологических систем. Учебное пособие. – М.: Мир науки, 2025. – Режим доступа: <https://izd-mn.com/PDF/27MNNPU25.pdf> – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-907891-70-8
DOI: 10.15862/27MNNPU25

Учебное пособие включает разделы для изучения дисциплины «Надёжность и диагностика технологических систем». Тематика и содержание разделов направлены на изучение вопросов обеспечения надежности, работоспособности и долговечности, диагностирования и прогнозирования технического состояния технологического оборудования машиностроительного производства.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника». Учебное пособие может быть полезным для студентов других технических специальностей.

ISBN 978-5-907891-70-8

© Алейников Дмитрий Павлович
© ООО Издательство «Мир науки», 2025

Оглавление

Введение	4
1. Надежность невосстанавливаемых систем.....	6
1.1. Основные понятия теории надежности.....	6
1.2. Классификация и причины возникновения отказов	11
1.3. Показатели надежности невосстанавливаемых объектов	14
1.4. Вопросы для самопроверки.....	22
2. Структурная надежность невосстанавливаемых объектов	24
2.1. Понятие о структурной схеме надежности.....	24
2.2. Объекты с последовательным соединением элементов.	30
2.3. Объекты с параллельным соединением элементов.....	32
2.4. Объекты со смешанным соединением элементов.....	35
2.5. Объекты с произвольным соединением элементов	36
2.5.1. Логико-вероятностный метод.....	37
2.5.2. Метод минимальных путей и минимальных сечений.....	38
2.5.3. Методы преобразования соединения «треугольник» в соединение «звезда»	40
2.5.4. Метод разложения структуры по «ключевым элементам»	41
2.6. Вопросы для самопроверки	43
3. Надежность восстанавливаемых объектов	45
3.1. Понятие о потоке отказов и восстановлений.....	45
3.2. Показатели надежности восстанавливаемых объектов	47
3.3. Показатели ремонтпригодности	51
3.4. Комплексные показатели надежности объектов	54
3.5. Экономические показатели надежности	58
3.6. Вопросы для самопроверки	61
4. Резервирование объектов	63
4.1. Методы резервирования	64
4.2. Надежность невосстанавливаемых резервированных объектов.....	75
4.2.1. Общее горячее резервирование с целой кратностью	75
4.2.2. Раздельное горячее резервирование с целой кратностью	77
4.2.3. Мажоритарное резервирование.....	79
4.2.4. Общее холодное резервирование с целой кратностью	81
4.2.5. Раздельное холодное резервирование с целой кратностью.....	83
4.2.6. Скользящее резервирование	84
4.3. Вопросы для самопроверки	85
5. Основы технической диагностики	87
5.1. Основные понятия и определения	87
5.2. Технический контроль в задачах диагностики.....	92
5.3. Методы и средства технической диагностики	96
5.4. Вопросы для самопроверки.....	104
Заключение	106
Библиографический список	107

Введение

В современной технике проблема обеспечения надежности занимает центральное место, являясь одним из определяющих факторов прогресса и эффективности. Значимость надежности многократно возрастает в контексте все более широкого применения сложных технологических систем в промышленности. Современные технологические системы требуют тщательной проработки вопросов надёжности, начиная от проектирования и производства и заканчивая их испытаниями и эксплуатацией.

Надежность технологических систем, в широком понимании, означает способность системы функционировать бесперебойно и без отказов на протяжении заданного периода эксплуатации. При этом, критически важным является поддержание технических характеристик, установленных в проектной документации, в пределах допустимой точности. Современные технологические системы отличаются высокой сложностью и включают в себя большое количество компонентов, каждый из которых обладает собственной надежностью. Важно отметить, что надежность системы как целого не всегда оказывается выше надежности ее наиболее слабого элемента. Именно поэтому оценка надежности является неотъемлемой и важной частью всего жизненного цикла любой технологической системы – от проектирования до вывода из эксплуатации. Без детальной оценки надежности невозможно гарантировать стабильную и эффективную работу технологической системы.

Другое понятие, также неотъемлемо связанное с жизненным циклом технологических систем это – диагностика. Согласно ГОСТ 20911-89 [2] диагностика – это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. Без диагностики невозможно рассматривать надёжность, поскольку основное назначение диагностирования состоит в повышении надёжности объектов за счет эффективной проверки работоспособности и правильности функционирования, а также прогнозирования технического состояния.

Правильно функционирующим является объект, значения параметров которого в момент применения объекта по назначению находятся в требуемых пределах. Обнаружение и поиск дефектов являются процессами определения технического состояния объекта и объединяются общим термином «диагностирования».

1. Надежность невосстанавливаемых систем

1.1. Основные понятия теории надежности

Любая техническая отрасль знаний начинается с определения основных понятий, определений и терминологий. Поэтому для формирования понятийного аппарата прежде всего следует рассмотреть основную терминологию в области теории надежности, которая сформирована на основе нормативных документов (международных, межгосударственных, национальных и отраслевых стандартов) и научно-технической литературы.

Теория надежности – это научная дисциплина, занимающаяся изучением закономерностей возникновения отказов, разработкой методов оценки и прогнозирования надежности технических систем и устройств, а также способов повышения их надежности на всех этапах жизненного цикла. Она играет ключевую роль в обеспечении безопасной и эффективной эксплуатации сложных технологических систем [1].

В российской практике стандартизации, основным нормативными документами, регламентирующими терминологию в области надежности, являются ГОСТ 27.102-2021 и ГОСТ 27.004-85 [1,3]. Эти стандарты определяют основные понятия, используемые для описания надежности технологических систем и установления взаимосвязей между ними.

Технологическая система – совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций.

К предметам производства относятся: материал, заготовка, полуфабрикат и изделие, находящиеся в соответствии с выполняемым технологическим процессом в стадии хранения, транспортирования, формообразования, обработки, сборки, ремонта, контроля и испытаний. К регламентированным условиям производства относятся: регулярность поступления предметов производства, параметры энергоснабжения, параметры окружающей среды и

др. Следует различать четыре иерархических уровня технологических систем: технологические системы операций, технологические системы процессов, технологические системы производственных подразделений и технологические системы предприятий.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [1].

При анализе этого определения важно учитывать несколько ключевых аспектов. Прежде всего, подчеркивается процесс непрерывности выполнения объектом заданных функций. Понятие надежности не применимо к периодам, когда объект находится в состоянии простоя, вызванного проведением профилактических работ, ремонтом, заменой компонентов или другими мероприятиями, временно прекращающими его функционирование. В такие моменты объект не выполняет своего целевого назначения, и, следовательно, говорить о его надежности не имеет смысла.

Во-вторых, определение подчеркивает наличие «установленных пределов» для параметров объекта. Это означает, что даже при возникновении отказов отдельных элементов или подсистем, сложная система может сохранять свою работоспособность и продолжать выполнять свое функциональное предназначение, хотя и с возможным снижением эффективности или производительности. Важно, чтобы параметры работы системы оставались в пределах допустимых значений, определяемых техническими требованиями.

В-третьих, надежность целесообразно оценивать за определенные промежутки времени или наработку. Оценка надежности имеет смысл только применительно к конкретному периоду эксплуатации объекта, либо к определенному объему выполненной работы (наработке). Этот период может определяться временем до планового прекращения эксплуатации объекта, временем между техническими обслуживаниями или другими факторами.

Важно понимать, что надежность – это не просто единичное свойство, а сложное комплексное свойство, включающее в себя различные характеристики, такие как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Конкретный набор этих характеристик, определяющих надежность объекта, зависит от его назначения, условий применения и требований, предъявляемых к его работе. Различные технологические системы должны иметь сочетание этих свойств для обеспечения требуемого уровня надежности.

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

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

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

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

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

Важно отметить, что состояние объекта может изменяться не только в процессе его непосредственного использования, но и во время хранения на складе или при транспортировке. Известны случаи, когда после транспортировки объект полностью утрачивает свою работоспособность, либо его характеристики настолько ухудшаются, что он становится практически непригодным к эксплуатации. Для описания способности объекта сохранять свои свойства при хранении и транспортировке используется понятие «сохраняемость». Сохраняемость характеризует устойчивость объекта к

воздействию внешних факторов, возникающих во время хранения и транспортировки, и его способность сохранять свои эксплуатационные характеристики на протяжении определенного периода времени.

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

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 технологические системы могут находиться в различных состояниях, как показано на рисунке 1.1.

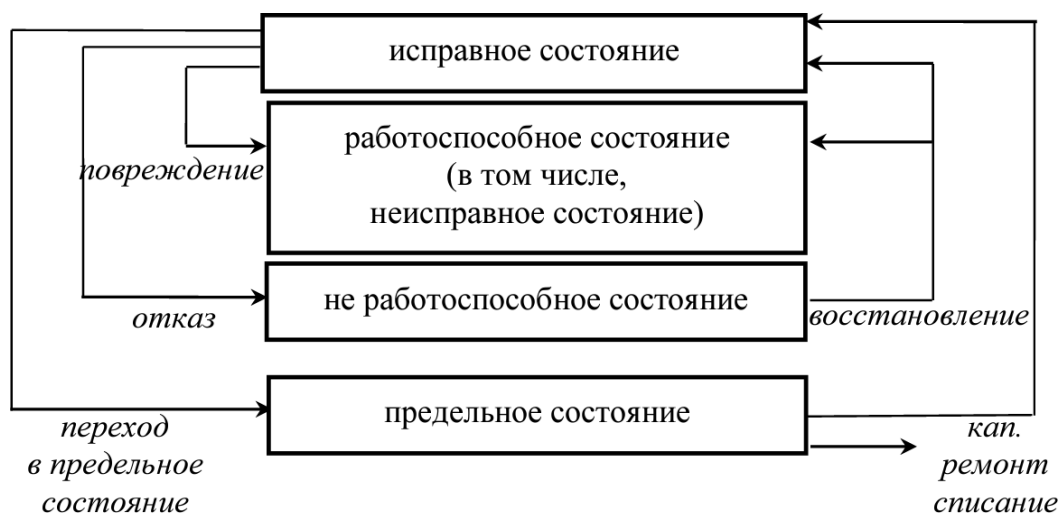


Рис 1.1. Состояния технологических систем

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

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

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

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

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

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

Как видно из рисунка 1.1, только в двух состояниях, исправном и работоспособном, система может выполнять свои функции. Поэтому, с точки зрения теории надёжности все элементы и системы могут находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном.

Переход объекта из одного состояния в другое происходит вследствие возникновения дефекта, повреждений и отказов, восстановлений и ремонтов. Событие, заключающееся в нарушении исправности объекта, называется **дефектом**. Если объект переходит в неисправное, но работоспособное состояние, то такое событие называют **повреждением**. Если объект переходит в неработоспособное или предельное состояние, то это событие называют **отказом**.

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

В соответствии с ГОСТ 27.102-2021 [1], объекты классифицируются на две основные категории: невосстанавливаемые и восстанавливаемые.

Невосстанавливаемым называется объект, восстановление работоспособного состояния которого в рассматриваемой ситуации не предусмотрено технической и конструкторской документацией. Обычно это одноразовые изделия или объекты, ремонт которых экономически нецелесообразен.

Восстанавливаемый объект – объект, восстановление работоспособного состояния которого в рассматриваемой ситуации предусмотрено технической и конструкторской документацией. Восстанавливаемые объекты подлежат ремонту и техническому обслуживанию с целью поддержания их в работоспособном состоянии на протяжении всего срока службы.

1.2. Классификация и причины возникновения отказов

Отказ – событие, которое заключается в нарушении работоспособного состояния объекта. После возникновения отказа, характеристики (параметры) технического объекта выходят за установленные пределы. Отказы, возникающие в процессе эксплуатации объектов, классифицируются по характеру изменения параметров, предшествующих отказу, на внезапные и постепенные.

Внезапные отказы характеризуются резким, скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Иными словами, отказ происходит внезапно, без видимых предварительных признаков. Причины таких отказов могут быть разнообразны. С одной стороны, это могут быть постепенные, но скрытые изменения в физической структуре объекта, которые в определенный момент достигают критической точки и приводят к лавинообразному разрушению. С другой стороны, причиной внезапного отказа могут стать неблагоприятные условия эксплуатации, такие как перегрузки, удары, воздействия агрессивных сред и т.п. Важной особенностью внезапных отказов является их непредсказуемость. Они могут произойти в любой момент

времени, и их практически невозможно предвидеть и, соответственно, предотвратить.

Постепенные отказы, напротив, характеризуются плавным и постепенным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. В отличие от внезапных, они являются следствием медленного накопления небольших изменений свойств объекта, таких как износ поверхностей трения, коррозия, усталость материала и т.д. Вследствие постепенного характера развития, такие отказы часто можно спрогнозировать и своевременно предотвратить. Решением задач определения текущего технического состояния и прогнозирования моментов выхода из строя объектов занимается техническая диагностика. Своевременная диагностика, техническое обслуживание и замена изношенных компонентов позволяют избежать наступления постепенного отказа и обеспечить надежную работу объекта.

По степени изменения параметров объекта (по типу) отказы подразделяются на отказы функционирования и параметрические отказы.

Отказы функционирования приводят к невозможности выполнения объектом своих функций (например, поломка зубьев шестерни, насос не подает топливо, двигатель не запускается, редуктор не передает движения и т.д.).

Параметрические отказы приводят к выходу основных характеристик объекта за допустимые пределы (например, снижение подачи топлива насосом, уменьшение мощности двигателя, потеря точности измерения напряжения вольтметром).

По наличию причинно-следственной взаимосвязи между отказами отказы делятся на независимые и зависимые. **Независимые отказы** не обусловлены отказами других объектов или элементов, **зависимые** являются следствием отказов других объектов или элементов. В более широком смысле отказы являются зависимыми, если при появлении одних из них вероятность появления других изменяется, и независимыми - если вероятность их появления не зависит от других отказов. Для выделения отказов-причин и отказов-

следствий иногда первые называют **первичными**, а вторые - **вторичными** или **результатирующими**.

По устойчивости неработоспособного состояния и возможности устранения отказы делятся на устойчивые (окончательные) и самоустраняющиеся. **Устойчивый отказ** устраняется только путем восстановления работоспособного состояния объекта, **самоустраняющийся** ликвидируется без внешнего вмешательства. **Сбой** - однократно возникающий самоустраняющийся отказ, **систематический отказ** - многократно возникающий сбой, **перемежающийся отказ** - многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера.

По возможности использования объекта после возникновения отказа отказы делятся на **полные** и **частичные**, по значимости на **критические**, **существенные** и **несущественные**, по характеру обнаруживаемости - на **очевидные** (явные) и **скрытые** (неявные), по происхождению - на **естественные** и **искусственные**, по возможности восстановления - на **устраняемые** и **неустраняемые**.

По причинам возникновения отказы делятся на конструкционные (проектно-конструкционные), производственные (производственно-изготовительные), эксплуатационные (эксплуатационно-технологические) и деградационные (износные). **Конструкционные отказы** возникают в результате несовершенства или нарушения установленных правил и норм конструирования объекта, **производственные** - в результате несовершенства или нарушения процесса изготовления или ремонта, **эксплуатационные** - в результате нарушения правил и условий эксплуатации, **деградационные** - в результате необратимых процессов старения, изнашивания, коррозии и усталости объектов [4].

По возможности устранения отказы делятся на устраняемые и неустраняемые. При **устраняемом отказе** возможно восстановление системы, как в условиях эксплуатирующих подразделений, так и на ремонтных

предприятиях. В случае **неустраняемого отказа** система или изделие подлежит списанию и утилизации.

По последствиям отказы делятся на защитные и опасные. **Защитный отказ** – это событие, которое заключается в нарушении работоспособного состояния системы при сохранении защитного состояния. **Опасный отказ** – это событие, которое заключается в нарушении работоспособного и защитного состояний [5].

1.3. Показатели надежности невосстанавливаемых объектов

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

Показатель надежности количественно характеризует, в какой степени объекту присущи определенные свойства надежности. В зависимости от того, сколько свойств надежности характеризуют показатели, различают единичные и комплексные показатели надежности: **единичные** характеризуют одно из свойств, **комплексные** – не менее двух. При определении надежности объектов используют две формы представления показателей – вероятностную и статистическую. **Вероятностная форма** удобна для аналитических расчетов, **статистическая** – при проведении экспериментальных исследований и ресурсных испытаний объектов на надежность. Кроме того, одни показатели надежности лучше интерпретируются в вероятностных терминах, другие – в статистических. С ростом числа испытываемых объектов или числа испытаний статистические показатели в пределе сходятся к вероятностным. Поэтому для характеристики основных показателей надежности удобнее пользоваться вероятностными формами, а статистические использовать для практических расчетов при экспериментальных исследованиях.

Для оценки уровня безотказности невосстанавливаемых объектов предусматриваются следующие количественные показатели [1]:

- вероятность безотказной работы (ВБР) $P(t)$;
- вероятность отказа $Q(t)$;

- частота отказов $f(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя наработка до отказа T_{cp} (наработка до отказа).

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

В общем случае величина вероятности безотказной работы зависит от наработки объекта и ее конкретное значение должно быть поставлено в соответствие с определенной наработкой или временем эксплуатации объекта. Нарботка измеряется в единицах времени или единицах объема выполненной работы.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы может быть получена в результате испытаний на надежность достаточно большого числа выборок. Способ вычисления зависит от плана испытаний. Для простейшего испытания N объектов до отказа последнего объекта без замен и восстановлений статистическая оценка вероятности безотказной работы определяется по следующей формуле (1.1):

$$P(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = \frac{N(0) - n(t)}{N(0)} = 1 - \frac{n(t)}{N(0)}, \quad (1.1)$$

где $N(0)$ – количество объектов, поставленных на испытание и находящихся в работоспособном состоянии на момент времени $t=0$; $N(t)$ – количество работоспособных объектов на момент времени или наработку t ; $n(t)$ – количество отказавших объектов за время или наработку t .

В ряде случаев имеется необходимость определять вероятность безотказной работы в интервалах времени (или наработки) от t_1 до t_2 , представляющую собой условную вероятность того, что объект не откажет в этом интервале, при условии, что он безотказно проработал до его начала. Оценка вероятности безотказной работы в интервалах времени от t_1 до t_2 выполняется по формуле (1.2):

$$P(t_1, t_2) = \frac{N(t_1)}{N(t_2)} = \frac{N(0) - n(t_2)}{N(0) - n(t_1)}, \quad (1.2)$$

где $N(t_1)$, $N(t_2)$ – количество объектов, находящихся в работоспособном состоянии на моменты времени t_1 и t_2 (начало и конец интервала времени испытаний) соответственно; $n(t_1)$, $n(t_2)$ – количество отказавших объектов на моменты времени t_1 и t_2 (начало и конец интервала времени испытаний) соответственно.

Вероятность безотказной работы как количественная характеристика надежности имеет следующие преимущества:

- характеризует изменение надежности оборудования во времени;
- является достаточно полной характеристикой надежности оборудования, поскольку охватывает большое количество факторов, влияющих на ее величину;
- позволяет дать оценку надежности оборудования в процессе его проектирования.

Наряду с указанными преимуществами $P(t)$ как критерий надежности имеет и существенные недостатки:

- характеризует надежность ремонтируемых изделий только до первого отказа и поэтому является достаточно полной характеристикой только для невозстанавливаемых объектов и неремонтируемых изделий;
- не позволяет охарактеризовать зависимость между временными составляющими цикла эксплуатации.

Вероятность отказа $Q(t)$ – вероятность того, что в течение заданного времени работы или заданной наработки объект откажет хотя бы один раз.

Статистическая оценка вероятности отказа за время или наработку определяется по формуле (1.3):

$$Q(t) = \frac{N(0) - N(t)}{N(0)} = \frac{n(t)}{N(0)}, \quad (1.3)$$

Отказ и работоспособное состояние – противоположные несовместные события, образующие полную совокупность возможных состояний объекта, поэтому в любой момент времени или при любой наработке выполняется условие (1.4):

$$P(t) + Q(t) = 1, \quad (1.4)$$

Также очевидно, что в начальный момент времени $Q(0) = 0$ и при достаточно длительной наработке $Q(\infty) = 1$.

Время работы объекта до отказа в теории надежности, как правило, является случайной величиной.

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа – являются безразмерными величинами, выражаются в долях единицы или в процентах.

Частота отказов $f(t)$ – отношение числа отказавших изделий в единицу времени к числу изделий, поставленных на испытание, при условии, что отказавшие изделия не восстанавливались и не заменяются новыми. Частота отказов также используется для описания мгновенных значений показателей надежности.

Вероятностное значение совпадает с дифференциальной функцией распределения наработки до отказа, а статистическое значение определяют по формуле (1.5):

$$f(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(0) \times \Delta t}, \quad (1.5)$$

где $n(\Delta t)$ – количество изделий, отказавших в интервале Δt ; Δt – принятый достаточно малый интервал времени; $N(0)$ – количество объектов, поставленных на испытание.

Для описания мгновенных значений показателей надежности используется дифференциальная функция – частота отказов или плотность распределения вероятности отказа, определяемая следующим соотношением (1.6):

$$f(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = -\frac{d}{dt} P(t), \quad (1.6)$$

Примерный вид функции плотности распределения наработки до отказа представлен на рисунке 1.2.

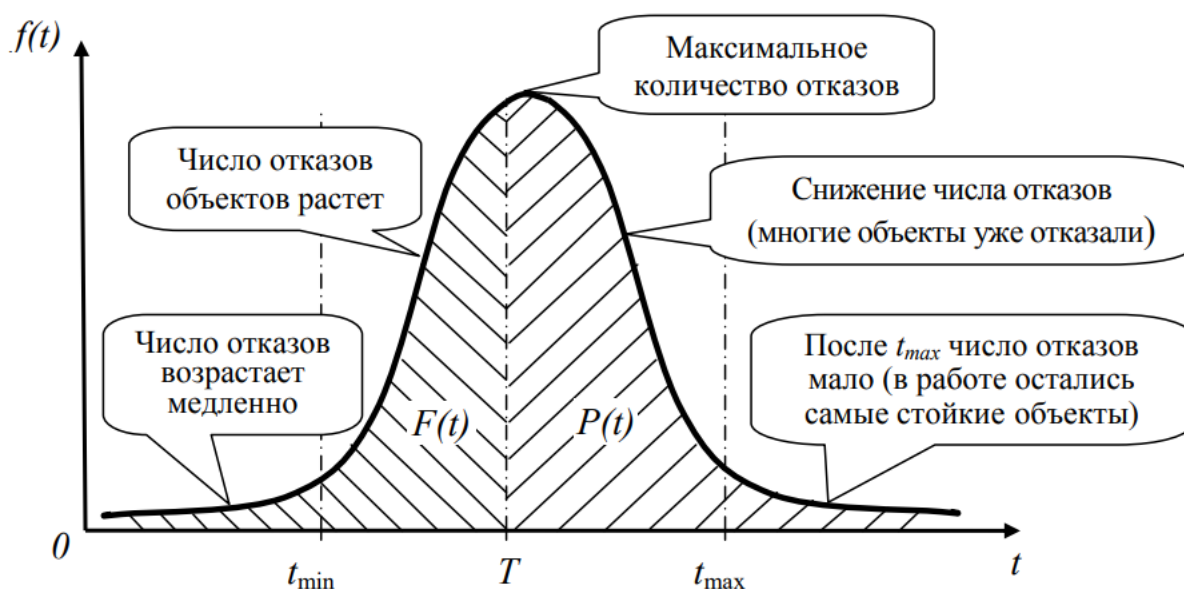


Рис 1.2. Функция плотности распределения наработки до отказа

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

Для аналитического определения интенсивности отказов по известному закону распределения наработки до отказа применяется формула (1.7):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (1.7)$$

Статистическое значение интенсивности отказов может быть определено как отношение количества изделий, отказавших в единицу времени, к среднему числу изделий, исправно работающих в данный промежуток времени.

Для статистического определения интенсивности отказов применяется формула (1.8):

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \times \Delta t}, \quad (1.8)$$

где Δt – принятый достаточно малый интервал времени; $n(\Delta t)$ – количество изделий, отказавших в интервале от $(t - \Delta t/2)$ до $(t + \Delta t/2)$; $N_{cp} = (N_1 + N_2)/2$ – среднее количество изделий, исправно работающих в интервале Δt ; N_1 –

количество изделий, исправно работающих в начале интервала; N_2 – количество изделий, исправно работающих в конце интервала.

Интенсивность отказов как количественная характеристика надежности обладает рядом достоинств: являясь функцией времени, позволяет наглядно установить характерные периоды работы изделия и тем самым определить методы повышения его надежности; дает возможность легко подсчитать другие показатели надежности. Недостаток показателя интенсивности отказов заключается в том, что он достаточно полно характеризует надежность изделия только до первого отказа и поэтому является удобной характеристикой лишь для невосстанавливаемых объектов и изделий [6].

Для большинства технологических систем функция интенсивности отказов представляет собой U-образную кривую, как представлено на рисунке 1.3.

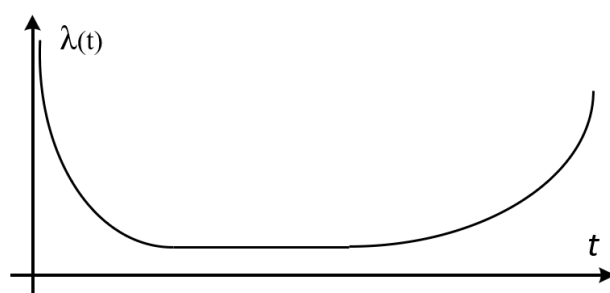


Рис 1.3. Функция интенсивности отказа

В соответствии с формой кривой интенсивности отказов можно выделить три периода жизненного цикла технологических систем: период приработки, период нормальной эксплуатации, период интенсивного износа, как представлено на рисунке 1.4.

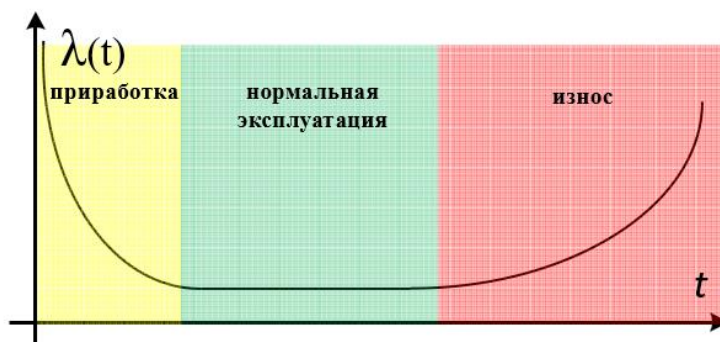


Рис 1.4. Периоды интенсивностей отказов технологических систем

В период приработки интенсивность отказов высока и уменьшается с течением времени. На этом участке выявляются грубые производственные дефекты, появившиеся в результате несовершенства или нарушения процесса изготовления или ремонта. Для устройств и технологических систем длительность этого участка составляет десятки, иногда сотни часов.

В период нормальной эксплуатации интенсивность отказов имеет приблизительно постоянное значение. Длительность этого участка для современных элементов, устройств и технологических систем составляет тысячи и десятки тысяч часов.

В период износа из-за усиления процессов старения элементов интенсивность отказов начинает возрастать. Момент начала этого участка может служить временем, при достижении которого объекты должны сниматься с эксплуатации или отправляться на капитальный ремонт.

Наработка на отказ T_o – отношение наработки восстанавливаемого изделия к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Как всякое математическое ожидание случайной величины наработка на отказ определяется следующей зависимостью (1.9):

$$T(o) = \int_0^{+\infty} t \times f(t) dt, \quad (1.9)$$

где $f(t)$ – дифференциальная функция распределения наработки на отказ.

Статистическое значение T_o определяется по формуле (1.10):

$$T(o) = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} = \frac{T_M}{m}, \quad (1.10)$$

где m – число отказов изделия за период t ; t_i – время исправной работы изделия между $(i - 1)$ -м и i -м отказами; T_M – суммарное время безотказной работы изделия за период t .

В английской литературе аналогичным показателем является MTBF (англ. Mean time between failures – среднее время между отказами, наработка на отказ) – среднее время между возникновениями отказов.

Средняя наработка до отказа T_{cp} – математическое ожидание наработки изделия до первого отказа. Статистическое значение T_{cp} определяется по формуле (1.11):

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} t_i}{N(0)}, \quad (1.11)$$

где t_i – время работы i -го изделия до первого отказа.

Наработка на отказ и наработка до отказа являются одними из наиболее наглядных количественных характеристик надежности. Однако и этим характеристикам свойственны существенные недостатки. Как математическое ожидание случайной величины они не могут полностью характеризовать время безотказной работы технологической системы, т.к. необходимо, по меньшей мере, знать еще и дисперсию времени его безотказной работы. Кроме того, эти характеристики не позволяют оценить надежность той части технологической системы, время работы которых меньше среднего времени безотказной работы.

На основе определения интенсивности отказов имеет место следующее равенство (1.12):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{-\frac{d}{dt}P(t)}{P(t)}, \quad (1.12)$$

После интегрирования этого выражения, получим (1.13) и (1.14):

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln P(t). \quad (1.13)$$

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (1.14)$$

Выражение (1.14) является одним из основных в теории надёжности. Из него следует, что вероятность безотказной работы представляет собой экспоненциальную монотонно убывающую функцию, которая в интервале времени или наработки от $t = 0$ до $t = \infty$ изменяется от 1 до 0 (рис. 1.5). Соответственно вероятность отказа меняется в том же интервале от 0 до 1.

Такой закон распределения получил название **экспоненциального закона** надежности.

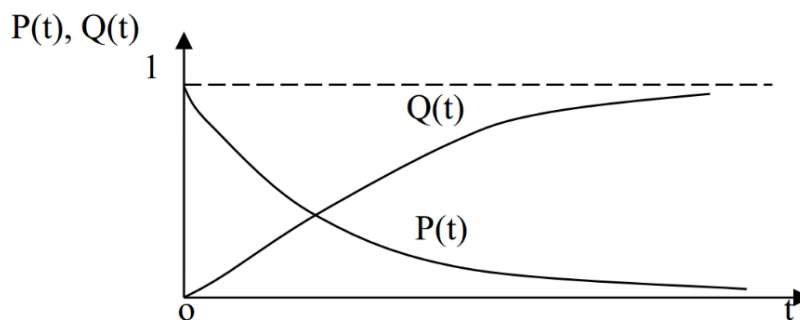


Рис 1.5. Экспоненциальный закон надежности

Также при условии, если интенсивность отказов является постоянной величиной, т.е. $\lambda = \text{const}$, то справедливы следующие выражения (1.15):

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad T_o = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.15)$$

1.4. Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение надежности. Для какой цели необходимо обеспечивать высокую надежность современных технологических систем?
2. Как в теории надежности называются системы, в которых после появления отказа происходит замена отказавшего объекта с целью восстановления его функционирования?
3. Как называют объект, способный выполнять возложенные на него функции, но не отвечающий всем требованиям, предъявляемым к нему?
4. Как называют объект, способный выполнять возложенные на него функции и отвечающий всем требованиям, предъявляемым к нему?
5. Как называют объект, неспособный выполнять возложенные на него функции и не отвечающий всем требованиям, предъявляемым к нему?
6. Как называется событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния?
7. Как называется событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния системы?

8. Как называется отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния?
9. Как называется отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии?
10. Как называется отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации?
11. Надежность, это комплексное свойство, которое включает в себя ...?
12. Как называется свойство объекта, заключающееся в способности сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта?
13. Как называется свойство системы или элемента непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки?
14. В теории надежности ВБР это?
15. На испытание поставлено 200 однотипных объектов. За 90 часов отказало 6 объектов. Каково значение вероятности безотказной работы в течение 90 часов?
16. На испытание поставлено 200 однотипных объектов. За 90 часов отказало 2 объекта. Каково значение вероятности безотказной работы в течение 90 часов?
17. На испытание поставлено 200 однотипных объектов. За 90 часов отказало 6 объектов. Каково значение вероятности отказа в течение 90 часов?
18. На испытание поставлено 100 однотипных объектов. За 80 часов отказало 15 объектов. Каково значение вероятности отказа в течение 80 часов?
19. В каких пределах изменяется вероятность безотказной работы за период эксплуатации?
20. В каких пределах изменяется вероятность отказа за период эксплуатации?

2. Структурная надежность невосстанавливаемых объектов

2.1. Понятие о структурной схеме надежности

Базовыми понятиями в теории надежности являются понятия элемента, системы и компонента.

Элемент – это любая часть системы, компонент, устройство, подсистема, функциональный модуль, оборудование или система, которая может быть рассмотрена как самостоятельная единица. Под элементом понимают часть системы, которая имеет самостоятельную характеристику надежности, используемую при расчетах надёжности, и выполняет определенную частную функцию в интересах системы. Элемент может представлять собой аппаратное средство, программное обеспечение или то, и другое. Он может, в отдельных случаях, включать людей.

Система – это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов.

Компонент – это элемент, рассматриваемый на самом низком иерархическом уровне при анализе системы.

С точки зрения надежности технологическая система должна иметь:

- определенную цель, выраженную функционированию системы;
- заданные условия эксплуатации;
- иерархическую структуру.

Любая технологическая система представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов. Физическая реализация этих связей может иметь различный характер. Для визуализации архитектуры объекта и характера взаимодействия между его компонентами используются различные типы схем, такие как структурные, функциональные, принципиальные и другие, каждая из которых имеет своё предназначение и позволяет получить представление о том, как функционирует та или иная технологическая система.

Для количественной оценки надежности используют структурные схемы надежности (ССН).

Структурная схема надежности (ССН) – это графическая модель, используемая для анализа надежности технологической системы, устройства или объекта, представляющая визуальное отображение взаимосвязей между элементами системы и показывает, как отказ одного или нескольких элементов влияет на работоспособность всей системы.

Ключевые характеристики ССН:

1. **Графическое представление.** ССН представляет собой граф, в котором узлы (вершины) соответствуют элементам системы, а ребра (соединения) отражают логические связи между ними.
2. **Логические связи.** ССН отображает логические связи типа «последовательное соединение» (отказ одного элемента приводит к отказу всей системы) и «параллельное соединение» (система продолжает работать, если хотя бы один элемент в параллельной цепи исправен). Могут использоваться и более сложные логические конструкции.
3. **Оценка надежности системы.** ССН позволяет наглядно представить структуру надежности системы и рассчитать ее общую надежность на основе надежности отдельных элементов.
4. **Идентификация критических элементов.** Анализ ССН позволяет выявить элементы, отказ которых наиболее сильно влияет на надежность системы в целом. Это позволяет сосредоточить усилия на повышении надежности этих критических элементов.
5. **Разработка стратегий резервирования.** ССН помогает определить оптимальные способы резервирования элементов для повышения надежности системы.

В отличие от принципиальной схемы, показывающей физическое соединение, структурная схема надежности (ССН) показывает, как отказ компонента влияет на всю систему. Одно и то же соединение на принципиальной схеме может быть представлено по-разному в ССН, в зависимости от того, какой тип дефекта рассматривается и как он влияет на работу других компонентов [5, 6].

Пример изображения функциональной и структурной схемы надежности нормирующего преобразователя температуры (НПТ), представлен на рисунке 2.1.

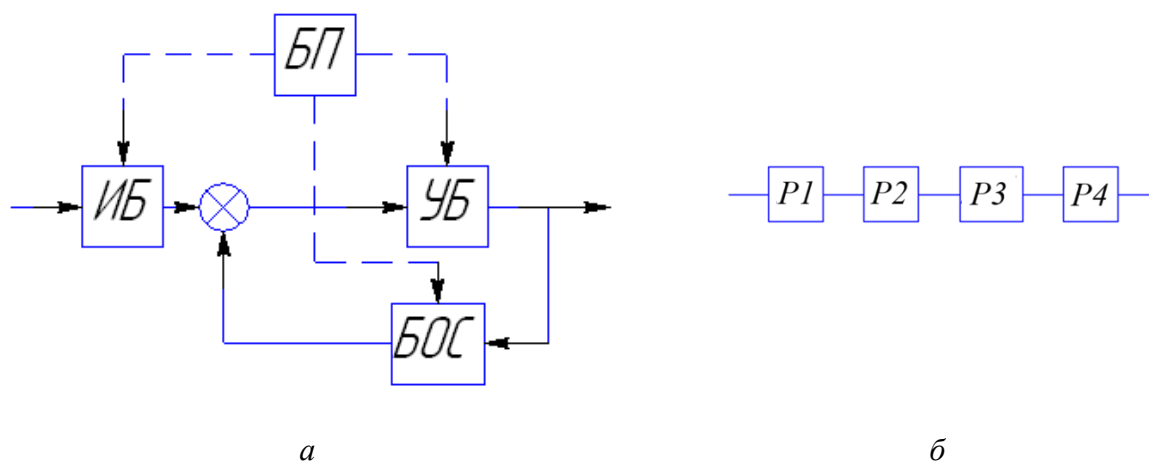


Рис. 2.1. Пример представления схемы НПТ:

а – функциональная схема; *б* – структурная схема надежности

В данном примере *ИБ* – измерительный блок; *УБ* – усилительный блок; *БОС* – блок отрицательной обратной связи; *БП* – блок питания; *P1, P2, P3, P4* – вероятности безотказной работы соответствующих блоков. Структурная схема надежности представлена последовательным соединением элементов т.к. выход их строя каждого отдельного блока приведет к отказу всей системы.

Основными типами отказов диодов в электрических схемах являются обрыв и короткое замыкание. Для иллюстрации, рассмотрим два параллельно соединенных диода *VD1* и *VD2* (рис. 2.2). Важно понимать, что *ССН* зависит от того, какой тип отказа мы рассматриваем. При коротком замыкании достаточно отказа одного диода, чтобы вышла из строя вся параллельная цепь. Поэтому *ССН* будет последовательной, отражая необходимость работы обоих диодов. Напротив, при обрыве цепь откажет, только если выйдут из строя оба диода. В этом случае *ССН* будет параллельной, отражая достаточность работы хотя бы одного диода.

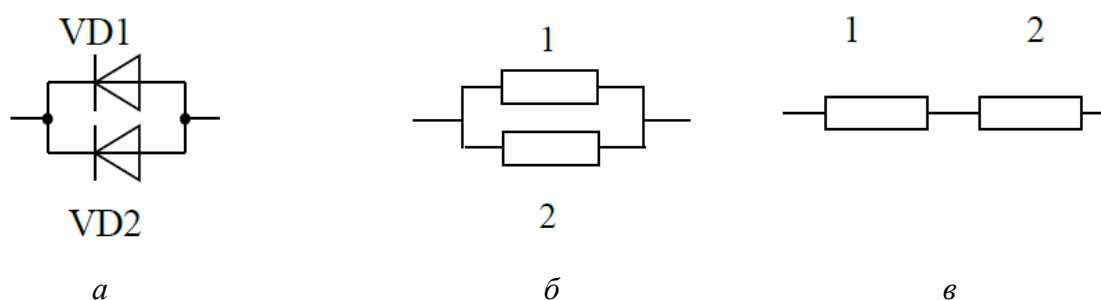


Рис. 2.2. Представление ССН электрической схемы:

a – исходная схема; *б* – ССН при дефекте «Обрыв»;

в – ССН при дефекте «короткое замыкание»

В различных гидравлических системах и системах подачи воды для повышения пропускной способности, долговечности или надежности используется параллельное или последовательное соединение фильтрующих элементов. Отказ фильтрующего элемента обычно происходит по двум основным причинам – засорения или разрыва фильтрующей сетки. На рисунках 2.3, 2.4 представлены примеры представления ССН для фильтров очистки воды, соединенных последовательно и параллельно при рассмотрении дефектов засорения и разрыва фильтрующей сетки.

Если фильтры очистки воды засоряются, ССН отражает их физическое расположение. В последовательной схеме засорение любого фильтра ведет к остановке системы. В параллельной схеме засорение одного фильтра просто перенаправит поток через другой, и система продолжит работать, хотя и с другими характеристиками.

Однако, при отказе из-за разрыва сетки, связь между физическим расположением и ССН становится обратной. В параллельной схеме разрыв сетки фильтра означает, что неочищенная жидкость прорвется, вызывая отказ системы. А в последовательной схеме разрыв фильтра, хотя и изменит характеристики потока, не приведет к полному отказу системы.

Поэтому, при анализе надежности системы фильтрации, необходимо учитывать как схему соединения фильтров (последовательная или

параллельная), так и тип отказа (засорение или разрыв). От этих факторов зависит выбор модели для расчета параметров надежности.

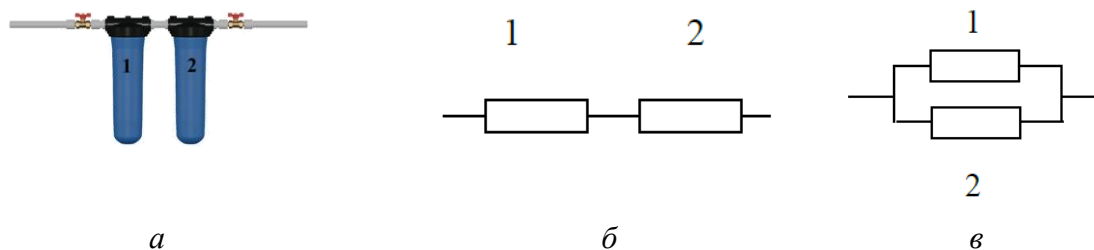


Рис. 2.3. Представление ССН фильтров очистки воды соединенных последовательно:

а – исходная схема; *б* – ССН при дефекте «засорение»;

в – ССН при дефекте «разрыв сетки»

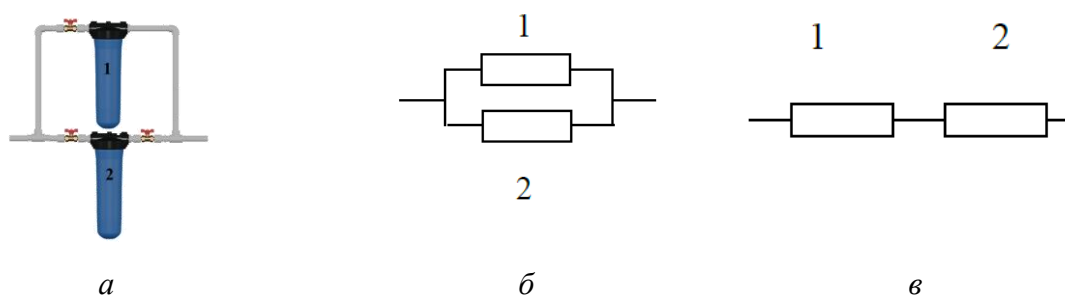


Рис. 2.4. Представление ССН фильтров очистки воды соединенных параллельно:

а – исходная схема; *б* – ССН при дефекте «засорение»;

в – ССН при дефекте «разрыв сетки»

Составление ССН начинается с оценки вклада каждого элемента в общую надежность технологической системы. С этой целью все элементы классифицируются по степени их влияния на работоспособность системы в целом:

1. Элементы с пренебрежимо малым влиянием. Отказы данных элементов не оказывают существенного влияния на функционирование системы в целом (например, деформация кожуха или косметические дефекты).

2. Высоконадежные элементы. Вероятность отказа этих элементов в рассматриваемом временном интервале крайне мала и стремится к нулю. Они, как правило, обладают большим запасом прочности (например, станины, массивные корпусные детали).

3. Восстанавливаемые элементы. Отказы этих элементов могут быть устранены путем ремонта или регулировки, проводимых во время работы системы или в рамках планового обслуживания (например, настройка оборудования или замена расходных материалов).

4. Критические элементы. Отказ одного или нескольких таких элементов приводит к отказу всей системы.

При анализе надежности объекта, в рассмотрение, как правило, включают последнюю группы - критические элементы.

Анализ надежности технологической системы предполагает следующий алгоритм:

1. Функционально-структурный анализ. Выполняется анализ конструкции объекта и функциональных взаимосвязей между его составными частями, включая выполняемые объектом и его элементами функции.

2. Определение критериев работоспособности. Формулируются определения понятий «безотказная работа» и «отказ» для рассматриваемого объекта.

3. Идентификация отказов и их последствий. Определяется перечень возможных отказов объекта и его составных частей, а также выявляются причины и анализируются потенциальные последствия этих отказов.

4. Оценка влияния отказов на работоспособность системы. Выполняется оценка влияния отказов составных частей на общую работоспособность объекта.

5. Декомпозиция объекта. Объект разделяется на элементы, для которых доступны или могут быть оценены показатели надежности.

6. Построение структурной схемы надежности. Формируется ССН, отражающая функциональную зависимость компонентов системы с точки зрения надежности.

7. Расчет показателей надежности. На основе ССН разрабатываются расчетные модели и определяются количественные показатели надежности объекта.

Анализ выполняется на основе допущения о бинарном состоянии объекта и его элементов (работоспособное или неработоспособное) и независимости отказов элементов.

Расчет показателей надежности сложных объектов реализуется с использованием различных методологических подходов, включающих методы перечисления элементарных событий (метод прямого перебора, комбинаторный метод), топологические и структурно-логические методы (методы минимальных путей и минимальных сечений, разложения относительно особого (ключевого) элемента, методы, основанные на использовании графов состояний и деревьев отказов), а также методы математического и статистического моделирования, позволяющие получить оценки надежности на основе имитации поведения системы.

Структурные схемы надежности позволяют представить сложные технологические системы как комбинации четырех основных конфигураций соединений элементов: последовательное, параллельное, смешанное и произвольное.

2.2. Объекты с последовательным соединением элементов.

Последовательное соединение в структурной схеме надежности характеризуется тем, что отказ любого элемента влечет за собой отказ всей системы. Это основной тип соединения, часто используемый в анализе надежности. Последовательная модель надежности визуально представляется как схема, в которой два или более элементов расположены последовательно, образуя цепочку, где работоспособность каждого элемента критически важна для функционирования всей системы (рис. 2.5). Элементы имеют вероятность безотказной работы соответственно $P_1(t)$, $P_2(t)$, ..., $P_n(t)$.

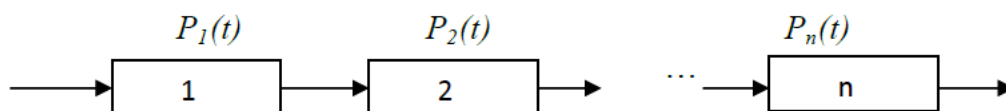


Рис 2.5. ССН с последовательным соединением элементов

Условием работоспособности последовательной схемы является работоспособность всех элементов ее составляющих.

Для данной системы можно сформулировать логическое условие работоспособности: система работоспособна тогда, когда работоспособны 1-й элемент «И» 2-й элемент «И» 3-й элемент «И» n-й элементы. Работоспособность системы может быть выражена критерием ВБР, а «И» соответствует оператору логического умножения. Следовательно, ВБР объекта с последовательным соединением элементов равна произведению вероятностей безотказной работы отдельных ее элементов (2.1):

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (2.1)$$

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

При равнонадёжности (идентичности) элементов в технологической системе, имеющих равные вероятности безотказной работы (2.2):

$$P_c(t) = P_i^n(t), \quad Q_c(t) = 1 - P_i^n(t). \quad (2.2)$$

В предположении, что элементы функционируют в режиме нормальной эксплуатации и подчиняются экспоненциальному закону распределения времени безотказной работы, вероятность безотказной работы может быть выражена через интенсивность отказов следующим образом (2.3):

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) dt}. \quad (2.3)$$

Интенсивность отказов последовательной схемы соединения элементов равна сумме интенсивностей отказов отдельных элементов (2.4):

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (2.4)$$

При равнонадёжности (идентичности) элементов в технологической системе, имеющих равные значения интенсивностей отказов (2.5):

$$\lambda_c(t) = n \times \lambda_c(t). \quad (2.5)$$

Таким образом, для последовательной структуры системы, надежность обратно пропорциональна количеству элементов. Повышение надежности может быть достигнуто посредством: минимизации числа последовательно соединенных элементов, снижения интенсивности отказов каждого элемента, или увеличения средней наработки до отказа для каждого элемента.

Для периода нормальной эксплуатации наработка до отказа последовательной структуры определяется соотношением (2.6):

$$T_o = \frac{1}{\lambda_c}. \quad (2.6)$$

Анализ представленных выражений позволяет сформулировать следующие заключения относительно надежности последовательной структуры:

- Вероятность безотказной работы обратно пропорциональна количеству последовательно соединенных элементов.
- Вероятность безотказной работы всей системы всегда меньше, чем минимальная вероятность безотказной работы любого из ее элементов (то есть хуже, чем у самого ненадежного элемента).

2.3. Объекты с параллельным соединением элементов

Параллельное соединение в структурной схеме надежности определяется как конфигурация, в которой отказ объекта происходит исключительно при одновременном отказе всех его составляющих элементов (рис. 2.6). Функционирование объекта с параллельным соединением элементов в течение времени t гарантируется при условии наличия хотя бы одного работоспособного элемента.

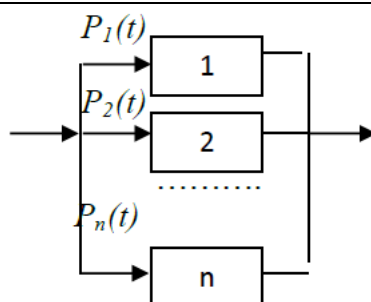


Рис 2.6. ССН с параллельным соединением элементов

Для данной системы можно сформулировать логическое условие отказа всей системы: система откажет только тогда, когда откажет 1-й элемент «И» 2-й элемент «И» 3-й элемент «И» n-й элементы. Отказ всей системы может быть выражен критерием вероятностей отказа, а «И» соответствует оператору логического умножения. Следовательно, вероятность отказа объекта с параллельным соединением элементов равна произведению вероятностей отказа отдельных ее элементов (2.7):

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)). \quad (2.7)$$

Вероятность безотказной работы может быть выражена через вероятность отказа (2.8):

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t). \quad (2.8)$$

При равнонадёжности (идентичности) элементов в технологической системе, имеющих равные вероятности безотказной работы (2.9):

$$Q_c(t) = Q_i^n(t) = (1 - P_i(t))^n, \quad P_c(t) = 1 - Q_i^n(t). \quad (2.9)$$

При экспоненциальном законе распределения вероятность безотказной работы через интенсивность отказов выразить следующим соотношением (2.10):

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt}). \quad (2.10)$$

Если все элементы имеют одинаковую надежность, то справедливо следующее соотношение (2.11):

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt})^n. \quad (2.11)$$

В случаях, когда интенсивность отказов является постоянно величиной т.е. $\lambda = \text{const}$, то справедливо следующее выражения (2.12):

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n. \quad (2.12)$$

Среднее время наработки параллельной структуры до определяется следующим соотношением (2.13):

$$T_o = \frac{1}{\lambda_c} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) = \frac{1}{\lambda_c} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}. \quad (2.13)$$

Анализ представленных выражений позволяет сформулировать следующие заключения относительно надежности системы с параллельным соединением элементов:

- Вероятность безотказной работы объекта увеличивается с ростом числа параллельно соединенных элементов.
- Вероятность безотказной работы системы всегда превосходит вероятность безотказной работы наиболее надежного элемента.
- Средняя наработка до отказа объекта с параллельным соединением элементов превышает среднюю наработку до отказа каждого отдельного элемента.

2.4. Объекты со смешанным соединением элементов

Структурная схема надежности со смешанным соединением характеризуется одновременным наличием последовательных и параллельных конфигураций (рис. 2.7).

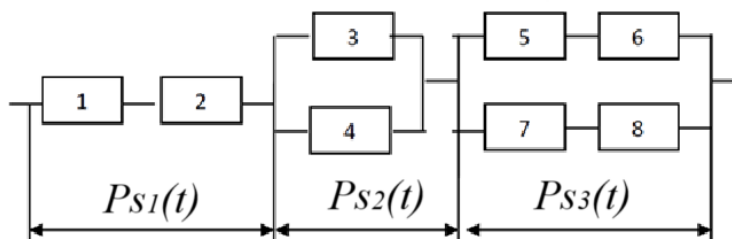


Рис 2.7. ССН со смешанным соединением элементов

Для анализа надежности таких систем применяется метод «свертки», заключающийся в последовательном редуцировании схемы и выполнении следующего алгоритма:

1. Все параллельные соединения заменяются эквивалентными элементами с определенными показателями надежности.
2. Все последовательные соединения заменяются эквивалентными элементами.
3. При наличии параллельных соединений, цикл преобразования повторяется.

Процесс редукции продолжается до тех пор, пока исходная ССН не будет преобразована к эквивалентной схеме, представляющей собой последовательное соединение элементов, что позволяет непосредственно оценить надежность всей системы.

Так, оценку ВБР системы, представленной на рисунке 2.7 можно выполнить следующим образом (2.14):

$$\begin{aligned}
 P_{s1}(t) &= P_1(t) \times P_2(t), \\
 P_{s2}(t) &= 1 - (1 - P_3(t)) \times (1 - P_4(t)), \\
 P_{s3}(t) &= 1 - (1 - P_5(t) \times P_6(t)) \times (1 - P_7(t) \times P_8(t)).
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

В итоге структурная схема надежности будет преобразована к последовательному соединению, как представлено на рисунке 2.7.

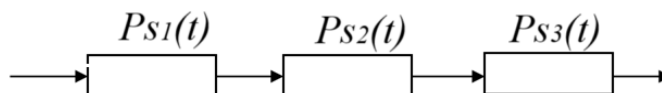


Рис 2.7. ССН с последовательным соединением элементов

Итоговая ВБР системы будет определена с использованием следующего выражения (2.15):

$$P_c(t) = P_{s1}(t) \times P_{s2}(t) \times P_{s3}(t). \quad (2.15)$$

2.5. Объекты с произвольным соединением элементов

Мостиковая схема (рис. 2.8) является распространенным примером объекта с произвольным соединением элементов.

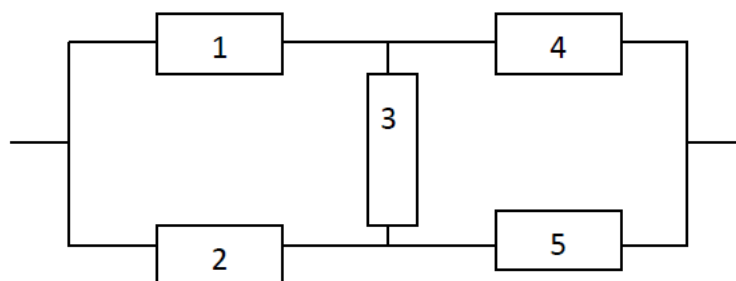


Рис 2.8. Мостиковая схема надежности

Для определения показателей надежности мостиковой схемы применяются следующие методы:

- Логико-вероятностный метод, основанный на аппарате булевой алгебры и теории вероятностей.
- Метод минимальных путей и сечений, позволяющий выявить минимальные наборы элементов, обеспечивающих функционирование системы, и минимальные наборы, приводящие к отказу.

- Метод эквивалентных структурных преобразований соединений «треугольник» в соединение «звезда», направленный на упрощение топологии схемы.
- Метод разложения структуры по «ключевым элементам», основанный на последовательном рассмотрении случаев работоспособности и отказа каждого ключевого элемента.

2.5.1. Логико-вероятностный метод

В логико-вероятностном методе для анализа надежности объекта строится математическая модель, представленная в терминах алгебры логики. Формализованная модель, полученная в результате, выражает условие работоспособности (или отказа) объекта в виде функции работоспособности (или функции неработоспособности). При ее формировании для каждого элемента учитываются два взаимоисключающих состояния: работоспособное и неработоспособное.

Функция работоспособности (или неработоспособности) формируется на основе таблицы перебора всех возможных состояний объекта (таблица 1). Общее число рассматриваемых состояний определяется как 2^n , где n - число элементов в составе объекта. В таблице работоспособное состояние элемента обозначается логической единицей («1»), а неработоспособное – логическим нулем («0»).

Таблица 1

Таблица перебора условий работоспособного и неработоспособного состояния элементов рассматриваемой схемы

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

В логико-вероятностном методе, из множества возможных функций надежности выбираются только те, которые удовлетворяют условиям решаемой задачи – определения вероятности безотказной работы или вероятности отказа.

Результирующая вероятность безотказной работы (или вероятность отказа) определяется как сумма произведений выбранных функций безотказной работы (или функций отказа).

Логико-вероятностный метод обладает универсальностью и применим к любым топологиям структурных схем надежности. Основным ограничением метода является экспоненциальный рост числа рассматриваемых состояний с увеличением количества элементов, что значительно усложняет анализ надежности сложных объектов.

2.5.2. Метод минимальных путей и минимальных сечений

Метод минимальных путей и минимальных сечений используется для упрощения анализа надежности сложных объектов.

В целях минимизации вычислительной сложности, перед составлением логических функций формируется логическая схема объекта на основе структурной схемы надежности. В основе построения логической схемы лежат понятия минимального пути и минимального сечения [4].

Минимальный путь (или минимальное проходное сочетание) представляет собой минимальный набор работоспособных элементов, обеспечивающий функционирование объекта. Отказ любого элемента в минимальном пути приводит к отказу объекта. Объект может иметь один или несколько минимальных путей. В объекте с последовательным соединением элементов существует единственный минимальный путь, включающий все элементы. Объект с параллельным соединением имеет количество минимальных путей, равное числу элементов, причем каждый минимальный путь состоит из одного элемента.

Метод минимальных путей позволяет получить оценку нижней границы вероятности безотказной работы объекта.

Минимальное сечение (или минимальный разрез) – это минимальный набор элементов, отказ которых приводит к отказу объекта. Восстановление работоспособности любого элемента в минимальном сечении приводит к восстановлению работоспособности объекта. Объект может иметь один или несколько минимальных сечений. Для объекта с параллельным соединением элементов существует одно минимальное сечение, включающее все элементы. В объекте с последовательным соединением число минимальных сечений равно числу элементов, и каждое сечение состоит из одного элемента.

Применительно к мостиковой схеме соединения элементов, структурные схемы надежности, соответствующие методу минимальных путей и методу минимальных сечений, представлены на рисунке 2.9.

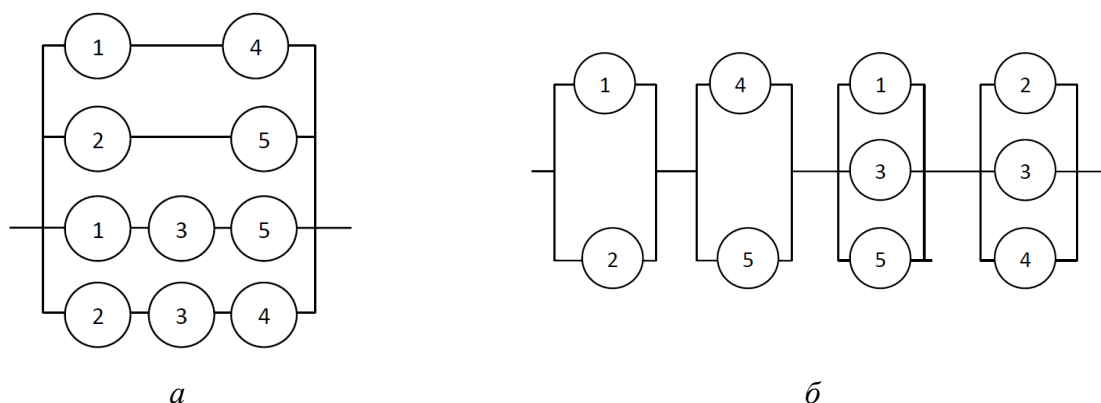


Рис. 2.9. ССН метода минимальных путей и минимальных сечений:

a – метод минимальных путей; *б* – метод минимальных сечений

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

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

Данный метод предполагает преобразование исходной топологии в эквивалентную схему смешанного соединения элементов, позволяющую применить метод «свертки» (рис. 2.10). Исходными данными для анализа являются вероятности безотказной работы каждого элемента. Целью преобразования является определение вероятностей безотказной работы виртуальных элементов (P_x , P_y , P_z), возникающих в преобразованной схеме.

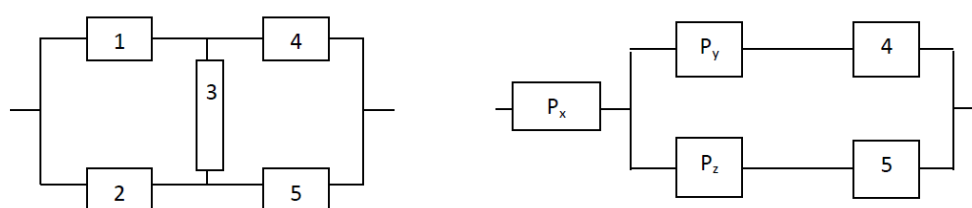


Рис 2.10. Преобразование мостиковой схемы в эквивалентную схему смешанного соединения элементов

Ввиду того, что вероятности безотказной работы элементов стремятся к единице, при выводе уравнений преобразования целесообразно использовать вероятности отказа $Q(t)$ элементов. Система уравнений, устанавливающая

соответствие между показателями надежности исходной и преобразованной схем, имеет следующий вид (2.16):

$$\begin{cases} Q_x + Q_y Q_z - Q_x Q_y Q_z = Q_1 Q_2 \\ Q_y + Q_x Q_z - Q_x Q_y Q_z = Q_1 Q_3 \\ Q_z + Q_x Q_y - Q_x Q_y Q_z = Q_2 Q_3 \end{cases} \quad (2.16)$$

В силу малости вероятностей отказов элементов, мы пренебрегаем членами высшего порядка, содержащими произведения вероятностей отказов. В результате получаем линеаризованные выражения для преобразования схемы из конфигурации «треугольник» в эквивалентную конфигурацию «звезда» (2.17):

$$\begin{cases} Q_x \approx Q_1 Q_2 & P_x = 1 - Q_x \\ Q_y \approx Q_1 Q_3 & P_y = 1 - Q_y \\ Q_z \approx Q_2 Q_3 & P_z = 1 - Q_z \end{cases} \quad (2.17)$$

На основе известных значений вероятностей отказов элементов, представляется возможным определить значения вероятностей безотказной работы элементов преобразованной схемы P_x, P_y, P_z .

2.5.4. Метод разложения структуры по «ключевым элементам»

Суть метода разложения по ключевым элементам (рис. 2.11) заключается в декомпозиции исходной структуры на две более простые, удовлетворяющие условию сохранения вероятности работоспособного состояния: сумма вероятностей работоспособных состояний декомпозированных структур равна вероятности работоспособного состояния исходной структуры.

Алгоритм решения задачи определения надежности включает следующие этапы:

1. Выбор ключевого элемента. В качестве ключевого элемента выбирается элемент, характеризующийся максимальной степенью связности с другими элементами объекта. В рассматриваемом случае, таким элементом является элемент под номером 3.

2. Условие работоспособности ключевого элемента. Предполагается, что ключевой элемент (элемент 3) находится в работоспособном состоянии (абсолютная надежность). В этом случае элемент 3 заменяется идеальной связью, что приводит к упрощению исходной схемы (схема б). Для учета вероятности работоспособного состояния элемента 3, он последовательно добавляется к полученной схеме. С использованием метода «свертки» определяется вероятность безотказной работы полученной схемы – $P_{\bar{6}}$.

3. Условие отказа ключевого элемента. Предполагается, что ключевой элемент находится в состоянии отказа. В этом случае положение элемента 3 на схеме обозначается разрывом цепи. К полученной структуре добавляется элемент, представляющий вероятность отказа ключевого элемента. В результате формируется схема P_6 .

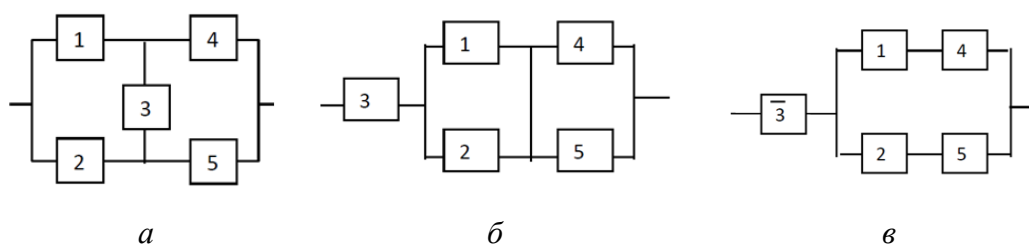


Рис. 2.11. Метод разложения структуры по «ключевым элементам»:

a – исходная схема; *б* – схема $P_{\bar{6}}$; *в* – Схема P_6

4. С использованием метода «свертки» определяется вероятность безотказной работы полученной схемы с использованием следующего выражения (2.17):

$$P(t) = P_{\bar{6}}(t) + P_6(t). \quad (2.17)$$

2.6. Вопросы для самопроверки

1. Как называются схема, представляющая наглядное графическое представление условий, при которых работает или не работает исследуемый элемент, объект, система, устройство и т.д?
2. Как называется соединение в структурной схеме надежности, при котором отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всего объекта в целом?
3. Как называется соединение в структурной схеме надежности, при котором объект отказывает только при отказе всех элементов его составляющих?
4. Как называется соединение в структурной схеме надежности, при котором имеется комбинация последовательных и параллельных схем соединений?
5. Как называется метод расчета надежности объектов с произвольным соединением элементов при котором рассматривают все возможные состояния элементов (работоспособное и неработоспособное)?
6. Как называется метод расчета надежности объектов с произвольным соединением элементов при котором определяется оценка нижней границы надежности объекта?
7. Как называется метод расчета надежности объектов с произвольным соединением элементов при котором определяется верхняя оценка ВБР объекта?
8. Определите значение ВБР системы, состоящей из двух последовательно соединенных элементов ($P_1(t)=0.92$; $P_2(t)=0.80$)?
9. Определите значение ВБР системы, состоящей из двух последовательно соединенных элементов ($P_1(t)=0.72$; $P_2(t)=0.80$)?
10. Определите значение вероятности отказа системы, состоящей из двух последовательно соединенных элементов ($P_1(t)=0.5$; $P_2(t)=0.20$)?

-
11. Определите значение вероятности отказа системы, состоящей из двух последовательно соединенных элементов ($P_1(t)=0.9$; $P_2(t)=0.50$)?
 12. Определите значение ВБР системы, состоящей из двух параллельно соединенных элементов ($P_1(t)=0.92$; $P_2(t)=0.80$)?
 13. Определите значение ВБР системы, состоящей из двух параллельно соединенных элементов ($P_1(t)=0.82$; $P_2(t)=0.50$)?
 14. Определите значение вероятности отказа системы, состоящей из двух параллельно соединенных элементов ($P_1(t)=0.92$; $P_2(t)=0.80$)?
 15. Определите значение вероятности отказа системы, состоящей из двух параллельно соединенных элементов ($P_1(t)=0.72$; $P_2(t)=0.90$)?

3. Надежность восстанавливаемых объектов

3.1. Понятие о потоке отказов и восстановлений

Восстановлением называется процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния.

Восстанавливаемым считается объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и конструкторско-технической документацией.

Невосстанавливаемым считается объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической и конструкторско-технической документации.

Процесс функционирования восстанавливаемых объектов характеризуется чередованием периодов работоспособного состояния и периодов восстановления работоспособности (рис. 3.1). Эксплуатацию восстанавливаемого объекта можно рассматривать как стохастический процесс, состоящий из последовательности случайных интервалов времени, соответствующих работоспособному t_{pi} и неработоспособному t_{Bi} состояниям [4].

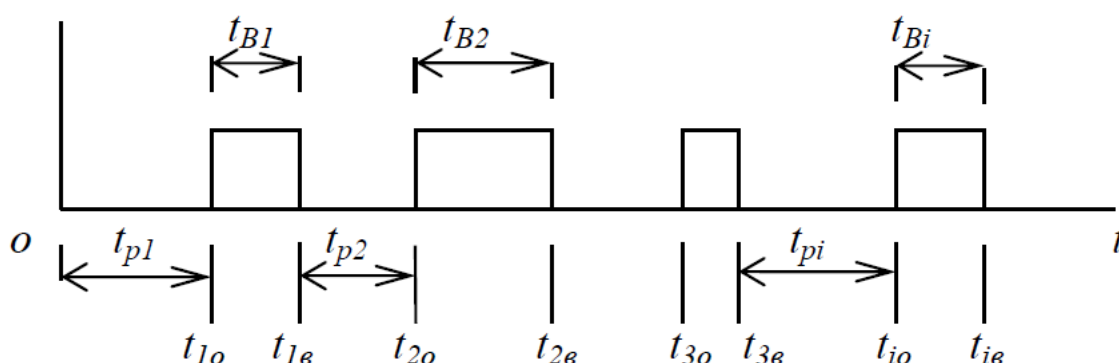


Рис 3.1. Жизненный цикл восстанавливаемых объектов

Простейшая модель функционирования восстанавливаемого объекта предполагает его нахождение в работоспособном состоянии в начальный момент времени ($t = 0$). В дальнейшем объект функционирует в течение случайного интервала времени t_{p1} до наступления первого отказа. После выполнения процедуры восстановления объект вновь переходит в работоспособное состояние и функционирует в течение случайного интервала времени t_{p2} до наступления второго отказа, и так далее.

Последовательность моментов времени наступления отказов ($t_{1o}, t_{2o}, \dots, t_{io}$) формирует **поток событий отказов**, а последовательность моментов времени завершения восстановления ($t_{1e}, t_{2e}, \dots, t_{ie}$) формирует **поток событий восстановлений**. Данные потоки событий представляют собой случайные процессы.

Рассмотрим некоторый поток событий, в котором события наступают независимо друг от друга и с некоторой фиксированной средней интенсивностью λ (событий в единицу времени). Тогда случайная величина X , равная числу событий k , произошедших за фиксированное время, имеет распределение Пуассона.

Распределение Пуассона играет особую роль в теории надежности – оно позволяет определить вероятности появления и восстановления после отказов.

Для пуассоновского потока вероятность наступления ровно k событий в промежутке времени от t_0 до t определяется следующим соотношением (3.1):

$$P_k(t_0, t) = P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (3.1)$$

где λ – среднее число событий в единицу времени эквивалентно интенсивности случайного потока.

Для пуассоновского потока вероятность наступления ровно k событий не зависит от времени t_0 , то есть в пуассоновском потоке время ожидания нового события не зависит от времени, прошедшего после последнего события. Для пуассоновского потока математическое ожидание случайного числа отказов $n(t)$ событий за время t определяется следующим соотношением (3.2):

$$M[n(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} k P_k(t) = \lambda t. \quad (3.2)$$

Пуассоновский поток характеризуется следующими свойствами, определяющими его применение в анализе надежности:

1. Стационарность. Вероятностные характеристики потока инвариантны относительно сдвига во времени. Это означает, что вероятность появления k отказов в интервале времени Δt зависит только от Δt , а не от абсолютного положения интервала на временной оси.

2. Ординарность. Вероятность появления более одного события в бесконечно малом интервале времени пренебрежимо мала.

3. Отсутствие последствий. Поток не обладает «памятью» о прошлых событиях. Вероятность появления отказа в заданном интервале времени не зависит от количества отказов, произошедших до начала этого интервала. Это свойство эквивалентно статистической независимости событий отказов.

3.2. Показатели надежности восстанавливаемых объектов

В предыдущих разделах теории надежности рассматривались исключительно невосстанавливаемые объекты, где целью анализа являлось определение времени безотказной работы от момента ввода в эксплуатацию до наступления отказа системы в целом. Аналогичное допущение делалось в отношении элементов резервирования, отказ которых считался необратимым.

Однако, данный подход является упрощением, поскольку один и тот же объект может классифицироваться как восстанавливаемый или невосстанавливаемый в зависимости от условий эксплуатации. При решении практических задач обеспечения, прогнозирования и оценивания надежности ключевым является решение о целесообразности восстановления объекта в случае отказа. Отнесение объекта к классу восстанавливаемых или невосстанавливаемых определяет набор используемых показателей надежности. В частности, показатель среднего времени восстановления имеет смысл только для восстанавливаемых объектов.

В дальнейшем будем рассматривать модели, предполагающие восстановление элемента (системы) после отказа, с учетом следующих допущений:

- Отказ обнаруживается мгновенно.
- Восстановление начинается немедленно после обнаружения отказа.
- Время восстановления является непрерывной случайной величиной, подчиняющейся экспоненциальному распределению.
- Количество ремонтных бригад неограниченно (отсутствие очередей на обслуживание).
- Восстановленный элемент (система) эквивалентен новому с точки зрения показателей надежности.
- Процедура ввода восстановленного элемента (системы) в эксплуатацию осуществляется мгновенно.

Введение столь большого числа допущений обусловлено сложностью математического описания человеческого фактора, оказывающего существенное влияние на процесс восстановления. В реальных условиях каждое из указанных допущений может быть нарушено: время обнаружения отказа отлично от нуля, процессы демонтажа и монтажа занимают определенное время, количество ремонтных ресурсов ограничено, характеристики восстановленных изделий могут отличаться от характеристик новых изделий.

В анализе надежности восстанавливаемых объектов следует учитывать, что до момента наступления первого отказа применимы методы, аналогичные используемым для невозстанавливаемых объектов. Однако, после первого отказа объект переходит в состояние восстановления и, после завершения процедуры восстановления, возвращается в работоспособное состояние, функционируя до следующего отказа. Данный процесс циклически повторяется вплоть до достижения предельного состояния.

Для оценки уровня надежности восстанавливаемых объектов предусматриваются следующие количественные показатели:

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

Параметр потока отказов $\omega(t)$ – отношение среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки. Параметр потока отказов определяется по следующей формуле (3.3):

$$\omega(t) = \frac{dn(t)}{dt}, \quad (3.3)$$

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

Для статистической оценки параметра потока отказов необходимо использовать следующую формулу (3.4):

$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t}, \quad (3.4)$$

где $n(\Delta t)$ – число отказов в рассматриваемом промежутке времени Δt ; N – число объектов, поставленных на испытания, при условии, что отказавшие объекты восстанавливаются или заменяются эквивалентными исправными.

Важное свойство потока отказов: если поток отказов является стационарным (то есть, в среднем, отказы происходят с одинаковой частотой в любой момент времени), то параметр потока отказов $\omega(t)$ становится постоянным и равным интенсивности отказов λ .

Это означает, что на практике, в большинстве технологических систем, где отказы происходят относительно равномерно, мы можем считать, что интенсивность отказов и параметр потока отказов это одно и то же, и использовать любой из этих параметров. Это значительно упрощает анализ и расчеты параметров надежности.

При условии ординарности потока отказов (то есть пренебрежимо малой вероятности одновременного возникновения нескольких отказов),

математическое ожидание числа отказов $n(t)$ за интервал времени t определяется выражением (3.5):

$$M[n(t)] = \int_0^t \omega(t) dt. \quad (3.5)$$

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

Время работы между отказами определяется как интервал времени, в течение которого объект функционирует в работоспособном состоянии между моментами завершения восстановления после предыдущего отказа и наступления последующего отказа.

Средняя наработка на отказ T представляет собой отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа отказов, произошедших в течение этой наработки (3.6):

$$T = \frac{t}{M[n(t)]}. \quad (3.6)$$

Для статистической оценки наработки на отказ необходимо использовать следующую формулу (3.7):

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{pi}, \quad (3.7)$$

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

При известном параметре потока отказов наработка на отказ определяется выражением (3.8):

$$T = \frac{1}{\omega(t)}. \quad (3.8)$$

Вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта в рассматриваемом интервале наработки определяется выражением (3.9):

$$P(t) = e^{-\int_0^t \omega(t) dt}. \quad (3.9)$$

Вероятность отказа восстанавливаемого объекта в рассматриваемом интервале наработки определяется выражением (3.10):

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\int_0^t \omega(t) dt}. \quad (3.10)$$

В случаях, когда поток отказов стационарен т.е. $\omega = \text{const}$, то справедливы следующие выражения (3.11-3.13):

$$P(t) = e^{-\omega t}. \quad (3.11)$$

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\omega t}. \quad (3.12)$$

$$T = \frac{1}{\omega}. \quad (3.13)$$

3.3. Показатели ремонтпригодности

После отказа объекты подвергаются ремонту, в результате которого восстанавливается их работоспособность. Для оценки возможности восстановления работоспособного состояния объекта в результате проведения ремонтов используют соответствующие показатели:

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

Параметр потока восстановлений (интенсивность восстановления) $\mu(t)$ представляет собой условную плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта. Она характеризует скорость восстановления системы в момент времени t , при условии, что процесс восстановления к этому моменту еще не завершился.

Аналитическое определение параметра потока восстановлений определяется с использованием следующего соотношения (3.14):

$$\mu(t) = \frac{f(t_B)}{1 - P_B(t)}, \quad (3.14)$$

где $f(t_B)$ – частота восстановлений; $P_B(t)$ – вероятность восстановления.

Для статистического определения параметра потока восстановлений используется следующее соотношение (3.15):

$$\mu(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{HB}(t)\Delta t}, \quad (3.15)$$

где $n_B(\Delta t)$ – число восстановленных элементов за промежуток времени Δt ; $N_{HB}(t)$ – число не восстановленных объектов за промежуток времени Δt .

Вероятность восстановления работоспособного состояния объекта $P_B(t)$ представляет вероятность того, что технологическая система будет отремонтирована и возвращена в рабочее состояние в течение заданного времени. Иными словами, это вероятность, что поломка будет устранена за отведенный период. Вероятность восстановления изменяется в пределах $0 \leq P_B(t) \leq 1$. Вероятность восстановления в начальный момент времени равна 0, а в конечный момент времени равна 1.

Вероятность восстановления объекта за время t при известном параметре потока восстановлений определяется следующим соотношением (3.16):

$$P_B(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt}. \quad (3.16)$$

Статистическая оценка вероятности восстановления работоспособного состояния за время t определяется соотношением (3.17):

$$P_B(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_B}, \quad (3.17)$$

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

Вероятность не восстановления работоспособного состояния объекта $Q_B(t)$ представляет вероятность того, что технологическая система не будет отремонтирована и возвращена в рабочее состояние в течение отведенного

времени. Вероятность не восстановления объекта за время t при известной вероятности восстановления или параметре потока восстановлений определяется следующим соотношением (3.18):

$$Q_B(t) = 1 - P_B(t) = 1 - (1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt}). \quad (3.18)$$

Среднее время восстановления T_B представляет собой математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после наступления отказа.

Эмпирически, среднее время восстановления T_B может быть оценено как отношение суммарного времени восстановлений объекта к математическому ожиданию числа восстановлений за достаточно длительный период эксплуатации. Также следует отметить, что T_B является основной характеристикой ремонтпригодности объекта и используется при оценке коэффициента готовности.

При известной величине вероятности восстановления среднее время восстановления определяется следующим соотношением (3.19):

$$T_B = \int_0^{\infty} (1 - P_B(t)) dt. \quad (3.19)$$

Статистическая оценка среднего времени восстановления определяется соотношением (3.20):

$$T_B = \frac{1}{n_B} \sum_{i=1}^{n_B} t_{Bi}, \quad (3.20)$$

где t_{Bi} – длительность времени восстановления i – го элемента; n_B – количество восстановлений.

Также при известном значении потока восстановлений оценка среднего времени восстановления осуществляется при помощи следующего соотношения (3.21):

$$T_B = \frac{1}{\mu(t)}. \quad (3.21)$$

Частота восстановления представляет собой плотность распределения времени восстановления и определяется с использованием следующего выражения (3.22):

$$f(t_B) = \frac{d}{dt} P_B(t). \quad (3.22)$$

В случаях, когда поток восстановлений стационарен т.е. $\mu = \text{const}$, то справедливы следующие выражения (3.23-3.25):

$$P(t) = e^{-\mu t}. \quad (3.23)$$

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\mu t}. \quad (3.24)$$

$$T = \frac{1}{\mu}. \quad (3.25)$$

3.4. Комплексные показатели надежности объектов

В задачах оценки эксплуатационной надежности объектов зачастую требуется учитывать взаимосвязанное влияние различных свойств надежности, что обуславливает недостаточность использования единичных показателей. В связи с этим применяются комплексные показатели, характеризующие одновременно несколько аспектов надежности, таких как безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость.

Комплексными показателями в соответствии с ГОСТ Р 27.102-2021 являются коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, коэффициент технического использования, коэффициент сохранения эффективности [1].

К числу наиболее распространенных комплексных показателей относятся:

- коэффициент готовности K_G ;
- коэффициент оперативной готовности $K_{Ог}$.
- коэффициент технического использования $K_{ти}$.

Коэффициент готовности K_G определяется как вероятность того, что объект находится в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, исключая плановые простои, обусловленные техническим обслуживанием или другими регламентными работами.

В условиях длительной эксплуатации (стационарном режиме) коэффициент готовности характеризует вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии.

Значение коэффициента готовности варьируется в диапазоне от 0 (полная неработоспособность в течение рассматриваемого периода) до 1 (абсолютная работоспособность в течение рассматриваемого периода).

Коэффициент готовности является мерой готовности объекта к применению по назначению, ограничиваясь при этом характеристикой его работоспособности. Таким образом, он представляет собой вероятность обнаружения объекта в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, не принадлежащий интервалам плановых простоев.

Для статистической оценки коэффициента готовности используется следующее соотношение (3.26):

$$K_G = \frac{T}{T + T_B} = \frac{T}{1 + \omega T_B} = \frac{T}{1 + \frac{\omega}{\mu}} \quad (3.26)$$

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

Для непрерывно работающих объектов коэффициент готовности определяется следующим соотношением (3.27):

$$K_G = \frac{T_K - t_B}{T_K}, \quad (3.27)$$

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

Коэффициент готовности является комплексной характеристикой, отражающей как безотказность объекта (вероятность отсутствия отказов), так и

его восстанавливаемость (скорость возвращения в работоспособное состояние после отказа). Таким образом, K_G позволяет оценить эксплуатационную технологичность объекта, а также эффективность следующих моментов:

- Качество планирования и организации работ по техническому обслуживанию и ремонту.
- Совершенство средств эксплуатации и ремонта, включая инструментальное обеспечение и диагностическое оборудование.
- Уровень организации труда и управления ресурсами.
- Квалификация и уровень подготовки обслуживающего персонала.

Пример. За период наблюдения технологическая система отказала 2 раза. Первая наработка на отказ составила 1100 ч, вторая – 1700 ч. Первый ремонт длился 24 ч, второй – 48 ч. Определить коэффициент готовности K_G .

Решение:

$$T = (1100 + 1700) / 2 = 1400 \text{ ч.}$$

$$T_B = (24 + 48) / 2 = 36 \text{ ч.}$$

$$K_G = 1400 / (1400 + 36) = 0,974.$$

Коэффициент оперативной готовности K_{OG} – вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного промежутка времени.

Коэффициент характеризует вероятность того, что объект будет находиться в работоспособном состоянии в произвольный момент времени и сможет безотказно функционировать в течение заданного временного интервала τ . До наступления момента необходимости выполнения целевой задачи объект может находиться в режиме ожидания или выполнять другие функции. Количественно K_{OG} определяется как произведение коэффициента

готовности объекта в момент времени t на вероятность его безотказной работы на интервале времени τ (3.28):

$$K_{ог}(t, \tau) = K_{г}(t) \times P(\tau). \quad (3.28)$$

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период. Количественно $K_{ти}$ определяется по следующей формуле (3.29):

$$K_{ти} = \frac{T_c}{T_c + T_{то} + T_p}, \quad (3.29)$$

где T_c суммарная наработка изделия, в единицах измерения ч; $T_{то}$ и T_p – соответственно продолжительности простоев машины при техническом обслуживании и ремонте, в единицах измерения ч.

Коэффициент технического использования учитывает простой машины как в неплановых, так и в плановых ТО и ремонтах.

Пример. За период наблюдения бункерные весы отказали 2 раза. Первая наработка на отказ составила 1100 ч, вторая – 1700 ч. Первый ремонт длился 12 ч, второй – 24 ч. Определить коэффициент технического использования, если продолжительность простоев бункерных весов в ТО и ремонтах за тот же период составила 72 ч.

Решение:

$$T_c = 1000 + 1600 = 2800 \text{ ч.}$$

$$T_{то} + T_p = 12 + 24 + 72 = 108 \text{ ч.}$$

$$K_{ти} = 2800 / (2800 + 108) = 0,962.$$

Коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$ определяет степень влияния отказов объекта на эффективность технологической системы при использовании по назначению. Количественно данный коэффициент

представляет собой отношение фактического значения показателя эффективности за заданный период эксплуатации к номинальному значению этого же показателя, рассчитанному в предположении отсутствия отказов объекта в течение указанного периода. Под эффективностью понимается способность объекта генерировать полезный выходной эффект, характеризуемый соответствующими показателями качества или производительности.

Показатель эффективности представляет собой количественную характеристику, отражающую качество выполнения объектом возложенных на него функций. Он может быть выражен в различных единицах измерения, таких как объем произведенной продукции, показатели качества продукции или наработка.

3.5. Экономические показатели надежности

Надежность технических объектов оказывает значительное влияние на экономические показатели, определяющие стоимость жизненного цикла технологической системы. Повышение безотказности и долговечности требует увеличения капитальных вложений в материалы, проектирование и производство, однако приводит к снижению эксплуатационных издержек, связанных с техническим обслуживанием, ремонтом и простоями оборудования. Зависимость капитальных (C_u) и эксплуатационных (C_{ε}) затрат от вероятности безотказной работы представлена на рисунке 3.2

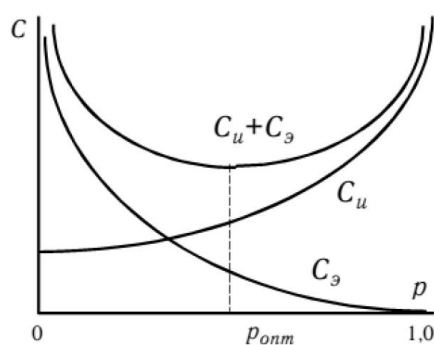


Рис 3.2. Зависимость капитальных и эксплуатационных затрат от вероятности безотказной работы

Экономический эффект от эксплуатации объекта изменяется во времени под влиянием трех факторов: затрат на изготовление $C_{\text{и}}$ (включая проектирование, монтаж, отладку и т.д.), эксплуатационных затрат $C_{\text{э}}$ (включая техническое обслуживание, ремонт, профилактические мероприятия и т.д.) и прибыли $C_{\text{п}}$ – полезного эффекта, получаемого от эксплуатации. Первые две величины снижают общий баланс эффективности эксплуатации, третья – увеличивает. Затраты на изготовление не изменяются от момента начала эксплуатации до списания. Эксплуатационные затраты имеют тенденцию к все более быстрому росту из-за процессов старения и износа.

Экономический эффект от эксплуатации технического объекта является функцией времени и определяется следующими факторами: капитальными затратами на изготовление объекта ($C_{\text{и}}$), эксплуатационными затратами ($C_{\text{э}}$) и прибылью, генерируемой объектом ($C_{\text{п}}$). Капитальные и эксплуатационные затраты оказывают негативное влияние на экономическую эффективность, в то время как прибыль способствует ее увеличению. При этом капитальные затраты остаются постоянными на протяжении всего периода эксплуатации, а эксплуатационные затраты проявляют тенденцию к экспоненциальному росту, обусловленному процессами старения и износа оборудования.

Динамика прибыли от эксплуатации объекта характеризуется тенденцией к снижению, обусловленной уменьшением производительности вследствие увеличения времени простоев, связанных с проведением ремонтов и технического обслуживания.

Кривая суммарной эффективности определяется по следующей формулой (3.30):

$$C = C_{\text{и}} + C_{\text{э}} + C_{\text{п}}. \quad (3.30)$$

Кривая суммарной эффективности эксплуатации объекта имеет выраженный максимум C_{max} и характеризуется двумя точками пересечения с осью времени (рис. 3.3). Экономически целесообразный срок эксплуатации объекта определяется интервалом между точкой окупаемости $T_{\text{ок}}$ и предельным

сроком эксплуатации $T_{пр}$, после которого эксплуатация становится экономически невыгодной.

Таким образом, показатели надежности оказывают непосредственное влияние на экономические показатели, определяющие эффективность эксплуатации объекта. В силу того, что экономические показатели интегрируют в себе влияние нескольких свойств надежности, их можно классифицировать как комплексные.

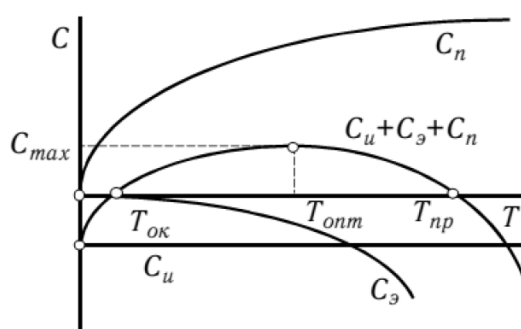


Рис 3.3. Зависимость изменения затрат на изготовление, эксплуатационных затрат и прибыли от срока службы

Экономическим критерием надежности могут служить удельные за траты на изготовление и эксплуатацию, определяемые по формуле (3.31):

$$K_э = \frac{C_{и} + C_э}{T_э}, \quad (3.31)$$

где $C_{и}$ — стоимость изготовления объекта; $C_э$ — затраты на эксплуатацию, ремонт и обслуживание; $T_э$ — это период целесообразной эксплуатации.

Коэффициент эксплуатационных издержек $K_{из}$ характеризует соотношение между стоимостью изготовления и эксплуатации изделия, определяется по следующей формуле (3.32):

$$K_{из} = \frac{C_{и}}{C_{и} + C_э}, \quad (3.32)$$

Более высокая надежность объекта обычно достигается за счет дополнительных затрат. Общие затраты на изготовление изделия складываются

из постоянных затрат C_K , не зависящих от уровня надежности, и переменной составляющей C_H , обусловленной требованиями надежности.

Повышение уровня надежности технического объекта, как правило, сопряжено с увеличением совокупных затрат на его изготовление. Общая стоимость изделия $C_{\text{И}}$ может быть представлена как сумма двух составляющих: постоянных затрат C_K , не зависящих от требований к надежности, и переменных затрат C_H , обусловленных обеспечением заданного уровня надежности (3.33):

$$C_{\text{И}} = C_K + C_H \quad (3.33)$$

Оценка переменной составляющей затрат, обусловленной требованиями надежности C_H , часто именуемой «ценой надежности», как правило, осуществляется на основе сопоставления разрабатываемого объекта с прототипом с использованием эмпирических зависимостей вида (3.34):

$$C_H = C_{H0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^\alpha, \quad (3.34)$$

где C_{H0} – цена надежности прототипа (аналога); T и T_0 – наработка на отказ или средний срок службы проектируемого объекта и прототипа; α – эмпирический показатель, характеризующий уровень производства, обычно принимается $\alpha \approx 0,5 \div 1,5$.

Экономические показатели надежности обеспечивают возможность наиболее объективной и комплексной оценки надежности технических объектов. В связи с этим, они широко используются для решения задач оптимизации характеристик надежности, разработки нормативных требований и стандартов, а также для принятия обоснованных управленческих решений в сфере эксплуатации и технического обслуживания.

3.6. Вопросы для самопроверки

1. Какие объекты называются восстанавливаемыми?
2. Из каких событий состоит жизненный цикл восстанавливаемых систем?

3. Как называется случайный поток событий, функция распределения которого подчиняется экспоненциальному закону?
4. Назовите основные свойства потока Пуассона?
5. Как называется отношение среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки?
6. При эксплуатации системы было зарегистрировано $n(t) = 3$ отказа. Распределение времени восстановления по отказам 1 - 120 мин., 2 - 20 мин., 3 - 40 мин. Определите величину среднего времени восстановления.
7. При эксплуатации системы было зарегистрировано $n(t) = 2$ отказа. Распределение времени восстановления по отказам 1 - 40 мин., 2 - 20 мин. Определите величину среднего времени восстановления.
8. Система имеет среднюю наработку на отказ $T = 60$ ч, среднее время восстановления $T_B = 5$ ч. Определите значение коэффициента готовности?
9. Назовите основные показатели ремонтпригодности?
10. Дайте определение параметра потока восстановлений?
11. Дайте определение параметра среднего времени восстановления?
12. Дайте определение параметра вероятности восстановления?
13. Для чего используется коэффициент готовности?
14. Для чего используется коэффициент оперативной готовности?
15. Для чего используется коэффициент технического использования?
16. Как определяется коэффициент эксплуатационных издержек?

4. Резервирование объектов

Современная элементная база электроники, радиотехники, механики и электротехники демонстрирует значения интенсивности отказов в диапазоне $\lambda=10^{-6}...10^{-7}\text{ч}^{-1}$. Прогнозируется дальнейшее снижение интенсивности отказов до уровня $\lambda=10^{-8}\text{ч}^{-1}$. Тем не менее, даже при достижении указанных показателей, наработка на отказ системы, содержащей $N=10^6$ элементов, составит лишь 100 ч, что является недостаточным для многих применений. Обеспечение требуемого уровня надежности сложных систем возможно только за счет применения различных методов резервирования. Резервирование представляет собой одно из ключевых средств повышения надежности объекта при использовании компонентов с ограниченной надежностью

Для формирования понятийного аппарата прежде всего следует рассмотреть основную терминологию в области резервирования технологических систем, которая сформирована на основе нормативных документов (международных, межгосударственных, национальных и отраслевых стандартов) и научно-технической литературы.

В соответствии с определением, приведенным в ГОСТ Р 27.102-2021 [1], резервирование представляет собой применение дополнительных ресурсов и (или) функциональных возможностей с целью сохранения работоспособности объекта при возникновении отказов одного или нескольких его элементов. Резервирование является методом повышения надежности, основанным на введении избыточности. Под избыточностью понимается наличие дополнительных средств и (или) возможностей, превышающих минимально необходимые для выполнения объектом заданных функций. Основной целью введения избыточности является обеспечение продолжения нормального функционирования объекта после наступления отказа в одном или нескольких его элементах.

Элементы резервированной системы носят следующие названия.

Минимальная функциональная структура объекта представляет собой конфигурацию, исключение любого элемента или связи, из которой приводит к невозможности реализации заданного набора функций. Данная структура также может быть обозначена как «основная».

Основной элемент – элемент, необходимый для выполнения требуемых функций при отсутствии активированного резерва.

Резервный элемент – элемент, предназначенный для выполнения функций, возложенных на основной элемент, в случае его отказа.

Резервированный объект – совокупность основного элемента и одного или нескольких резервных элементов.

4.1. Методы резервирования

Существующие методы резервирования могут быть классифицированы по ряду признаков, определяющих их характеристики и область применения. Основная классификация методов резервирования представлена на рисунке 4.1.



Рис 4.1. Классификация методов резервирования

Структурное резервирование, иногда называемое аппаратным (элементным, схемным), предполагает введение избыточности на уровне элементов объекта. Это означает, что в минимально необходимую функциональную структуру добавляются резервные элементы, предназначенные для замещения основных элементов в случае их отказа.

Примерами структурного резервирования являются: дублирование блоков питания в серверах, а также применение RAID-массивов в системах хранения данных.

Определение основного элемента не связано с понятием минимальности основной структуры, поскольку элемент, выполняющий функцию основного в одном режиме эксплуатации, может быть задействован в качестве резервного в другом режиме.

Например, в системе автоматического управления (САУ) основной контроллер обеспечивает управление процессом в штатном режиме, в то время как резервный контроллер находится в «горячем» резерве. Однако, в случае отказа основного контроллера, резервный контроллер автоматически переключается в режим управления и становится основным.

Временное резервирование предполагает использование резервов времени для повышения надежности выполнения задач. Суть метода заключается в выделении для выполнения объектом заданных функций интервала времени, превышающего минимально необходимое. Формирование резервов времени может быть обеспечено за счет повышения производительности элементов, использования инерционных свойств элементов системы, а также применения алгоритмов, предусматривающих возможность повторного выполнения операций в случае обнаружения ошибок.

Примерами временного резервирования являются: механизмы повторной передачи данных в сетевых протоколах (например, TCP), алгоритмы коррекции ошибок в системах хранения данных, а также методы демпфирования колебаний в системах автоматического управления, обеспечивающие устойчивость работы системы при наличии возмущений.

Информационное резервирование представляет собой метод повышения надежности передачи и хранения информации, основанный на введении избыточности в передаваемые или хранимые данные. Избыточность информации позволяет обнаруживать и (или) корректировать ошибки, возникающие вследствие отказов аппаратуры или воздействия помех.

Примерами информационного резервирования являются: многократная передача сообщения по каналу связи с последующим выбором наиболее достоверной версии; применение кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки (например, коды Хэмминга, коды Рида-Соломона), при передаче данных по каналам связи или хранении на носителях информации; использование контрольных сумм и циклических избыточных кодов (CRC) для проверки целостности данных.

Функциональное резервирование предполагает наличие нескольких альтернативных способов реализации заданной функции, использующих различные технические средства или алгоритмы. В отличие от структурного резервирования, где происходит дублирование элементов, функциональное резервирование обеспечивает гибкость и адаптивность системы к различным условиям эксплуатации.

Примерами функционального резервирования являются: в автоматической системе управления технологическим процессом может быть предусмотрено переключение между различными алгоритмами управления (например, ПИД-регулятор, нечеткий регулятор) в зависимости от текущего состояния процесса и доступных ресурсов; в системе связи может быть реализована возможность передачи данных по различным каналам (например, проводная связь, радиосвязь, спутниковая связь) с автоматическим переключением на резервный канал в случае ухудшения качества основного канала.

Для оценки надежности систем с функциональным резервированием используются следующие показатели: вероятность выполнения данной

функции, среднее время выполнения функции, коэффициент готовности для выполнения данной функции.

Нагрузочное резервирование представляет собой метод повышения надежности, основанный на обеспечении избыточной способности элементов системы выдерживать действующие нагрузки. В основе данного подхода лежит создание оптимальных запасов прочности, позволяющих системе функционировать в условиях возможных перегрузок или отклонений от штатных режимов работы.

Примерами нагрузочного резервирования являются: увеличение сечения проводов в электрических сетях для повышения их допустимой токовой нагрузки, использование более прочных материалов при изготовлении несущих конструкций зданий и сооружений, а также применение радиаторов увеличенного размера для охлаждения электронных компонентов.

Кроме того, нагрузочное резервирование может быть реализовано посредством введения дополнительных защитных или разгружающих элементов, предназначенных для ограничения или перераспределения нагрузки. Примерами таких элементов являются: предохранители, автоматические выключатели, клапаны сброса давления, а также различные демпфирующие устройства, снижающие вибрационные нагрузки.

Перечисленные виды резервирования могут быть применены либо к системе в целом, либо к отдельным элементам системы или к их группам. В первом случае резервирование называется общим, во втором – отдельным. Сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте называется смешанным.

В зависимости от способа включения резервных элементов выделяют следующие виды резервирования: постоянное, динамическое, резервирование замещением, скользящее и мажоритарное.

Постоянное резервирование характеризуется отсутствием перестройки структуры объекта при наступлении отказа одного из его элементов. Ключевой особенностью постоянного резервирования является отсутствие необходимости

в специальных устройствах переключения для ввода в действие резервного элемента, а также непрерывность функционирования системы (рис. 4.2 и 4.3). В простейшем случае постоянное резервирование реализуется посредством параллельного соединения элементов без использования переключающих устройств.

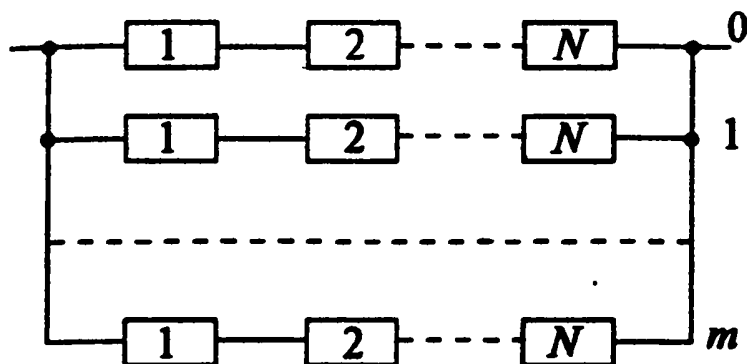


Рис 4.2. Общее резервирование с постоянно включенным резервом

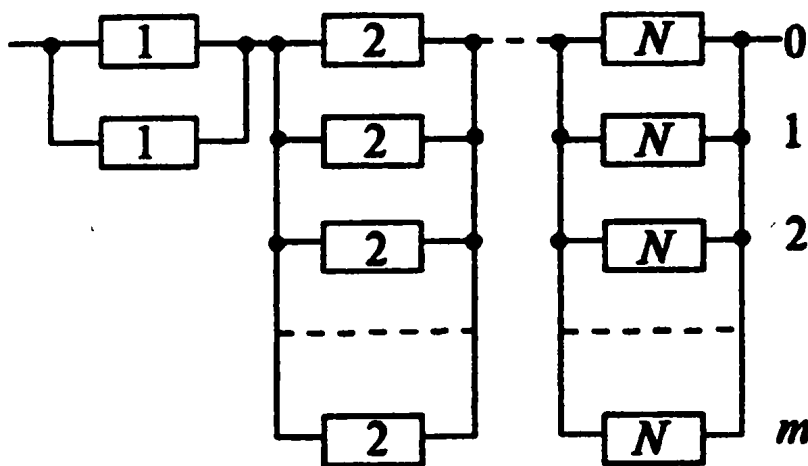


Рис 4.3. Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом

Динамическое резервирование характеризуется перестройкой структуры объекта при наступлении отказа одного или нескольких его элементов. Существуют различные реализации динамического резервирования, отличающиеся алгоритмами обнаружения отказов и переключения на резервные элементы.

Резервирование замещением представляет собой разновидность динамического резервирования, при котором передача функций от основного элемента к резервному осуществляется только после констатации отказа основного элемента.

К преимуществам резервирования замещением (рис. 4.4 и 4.5) относятся:

- Минимальное воздействие на режим работы основного элемента до момента отказа.

Повышенная сохраняемость резервных элементов, обусловленная их нахождением в нерабочем состоянии в период функционирования основных элементов.

- Возможность использования одного резервного элемента для замещения нескольких основных элементов, что позволяет оптимизировать структуру системы.

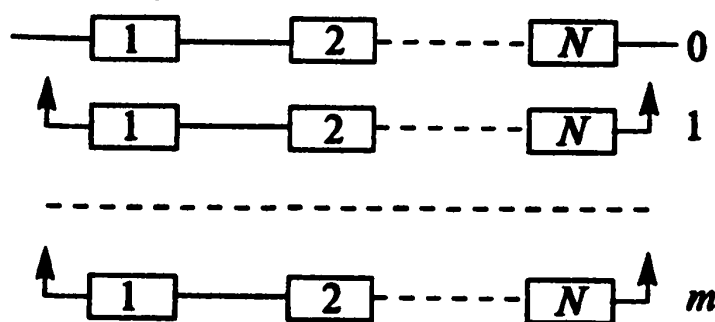


Рис 4.4. Общее резервирование с замещением

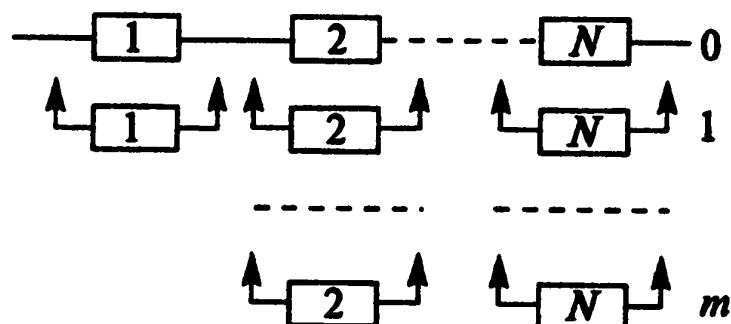


Рис 4.5. Раздельное резервирование с замещением

Ключевым недостатком резервирования замещением является потребность в использовании переключающих устройств, обеспечивающих ввод в действие резервных элементов. При применении раздельного резервирования количество переключающих устройств соответствует количеству основных элементов, что может существенно снизить общую надежность системы.

Следовательно, резервирование замещением целесообразно применять для крупных функциональных блоков или системы в целом, либо при условии высокой надежности используемых переключающих устройств.

Скольльзящее резервирование представляет собой разновидность резервирования замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами, обладающими возможностью замещения любого отказавшего основного элемента в пределах данной группы, как представлено на рисунке 4.6.

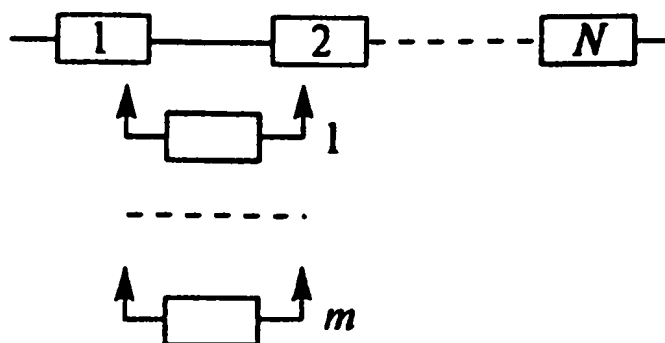


Рис 4.6. Скольльзящее резервирование

В системах автоматического управления широкое распространение получило **мажоритарное резервирование**, также известное как резервирование с «голосованием». Данный метод основан на использовании дополнительного мажоритарного (логического) элемента (рис. 4.7), осуществляющего сравнение сигналов, поступающих от нескольких элементов, выполняющих идентичные функции. В случае совпадения большинства сигналов, результат передается на выход устройства.

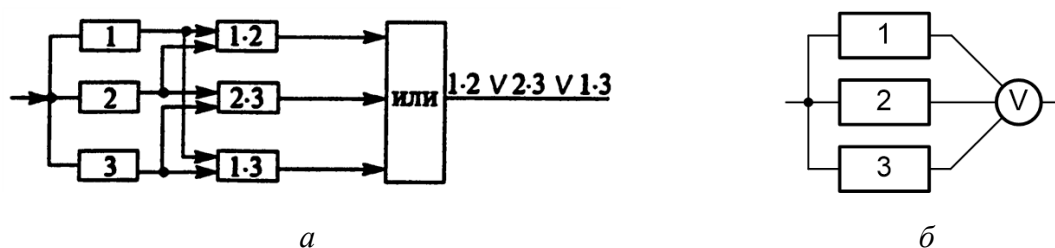


Рис. 4.7. Мажоритарное резервирование «2 из 3»:

а – логическая схема; б – блок-схема надежности

На рисунке 4.7 изображена схема мажоритарного резервирования типа «2 из 3», в которой решение считается достоверным при совпадении результатов, поступающих как минимум от двух из трех элементов. Данный принцип широко используется при построении систем противоаварийной защиты (ПАЗ). Возможны реализации с другими мажоритарными соотношениями, например, «3 из 5».

Ключевым преимуществом мажоритарного резервирования является обеспечение повышения надежности при различных типах отказов элементов и повышение достоверности функционирования информационно-логических объектов.

Степень избыточности, вносимой резервированием, количественно характеризуется **кратностью резервирования**. Кратность резерва определяется как отношение количества резервных элементов объекта к количеству резервируемых ими основных элементов, представленное в виде несократимой дроби.

Кратность резервирования m определяется соотношением (4.1):

$$m = \frac{P}{O}, \quad (4.1)$$

где P – число резервных элементов; O – число основных элементов.

При кратности резервирования $m = 1$ (целая кратность) система имеет один основной и один резервный элемент, а общее количество элементов в системе равно двум.

При кратности резервирования $m = 3$ (целая кратность) система имеет один основной и три резервных элемента, а общее количество элементов в системе равно четырем.

При кратности резервирования $m = 4/2$ (дробная кратность) система имеет два основных и четыре резервных элемента, а общее количество элементов в системе равно шести. Данная форма представления кратности представляется несокращаемой дробью.

В большинстве практических реализаций резервирования с дробной кратностью число основных элементов превышает число резервных элементов. Частный случай резервирования, характеризующийся кратностью, равной единице ($m = 1$), обозначается термином «дублирование».

В зависимости от режима функционирования резервных элементов выделяют следующие типы резервирования: нагруженное, облегченное и ненагруженное, как представлено на рисунке 4.8.

Нагруженный («горячий») резерв характеризуется тем, что резервные элементы функционируют в том же режиме, что и основные элементы, выполняя те же функции. При этом предполагается, что интенсивность отказов элементов нагруженного резерва соответствует интенсивности отказов основных элементов.

Примерами «горячего» резервирования являются следующие системы:

- 1) Два блока питания в сервере, работающих одновременно и разделяющих нагрузку. Если один блок питания выходит из строя, второй немедленно принимает на себя всю нагрузку без перерыва в работе сервера. Оба блока питания постоянно находятся под напряжением и работают, поэтому они «горячие».
- 2) Два идентичных насоса в системе водоснабжения, работающих параллельно. Оба насоса качают воду, разделяя общий поток. Если один насос выходит из строя, второй автоматически увеличивает свою производительность, чтобы компенсировать потерю.

3) Несколько жестких дисков, работающих в RAID 1 (зеркалирование). Все диски содержат идентичную копию данных и работают одновременно. Если один диск выходит из строя, система продолжает работать с оставшегося диска без потери данных и времени.

Облегченный («теплый») резерв предполагает функционирование резервных элементов в режиме, характеризующемся меньшей нагрузкой по сравнению с режимом работы основных элементов. Следствием этого является, как правило, более высокий уровень безотказности резервных элементов по сравнению с основными.

Примерами «теплого» резервирования являются следующие системы:

- 1) Резервный генератор электроэнергии, который находится в режиме ожидания, но готов запуститься в любой момент при отключении основного питания. Генератор регулярно проверяется и прогревается, но не работает постоянно под нагрузкой.
- 2) Резервный веб-сервер, который получает обновления данных с основного сервера, но не обрабатывает запросы пользователей до тех пор, пока основной сервер не выйдет из строя. Резервный сервер находится в "полуактивном" состоянии, готовый к переключению.
- 3) Источник бесперебойного питания (UPS), подключенный к электросети, но не питающий нагрузку напрямую, а заряжающий аккумулятор. При пропадании напряжения в сети, UPS переходит на питание от аккумулятора.

Ненагруженный («холодный») резерв характеризуется тем, что резервные элементы находятся в состоянии хранения или ожидания, не подвергаясь воздействию рабочих нагрузок, до момента их ввода в действие для выполнения функций основного элемента. В идеализированных моделях предполагается, что элементы ненагруженного резерва обладают абсолютной надежностью и не подвержены отказам в состоянии хранения.

Примерами «холодного» резервирования являются следующие системы:

- 1) Запасной контроллер для системы управления технологическим процессом, хранящийся на складе. Контроллер не используется и не подвергается никаким

нагрузкам до тех пор, пока не понадобится замена вышедшего из строя основного контроллера.

2) Резервная копия базы данных, хранящаяся на внешнем жестком диске или в облаке. Данные не используются и не обновляются до тех пор, пока не потребуется восстановление базы данных после сбоя.

3) Комплект запасных частей для оборудования, хранящийся на складе ремонтной службы. Запчасти не используются до тех пор, пока не потребуется замена изношенных или поврежденных деталей оборудования.

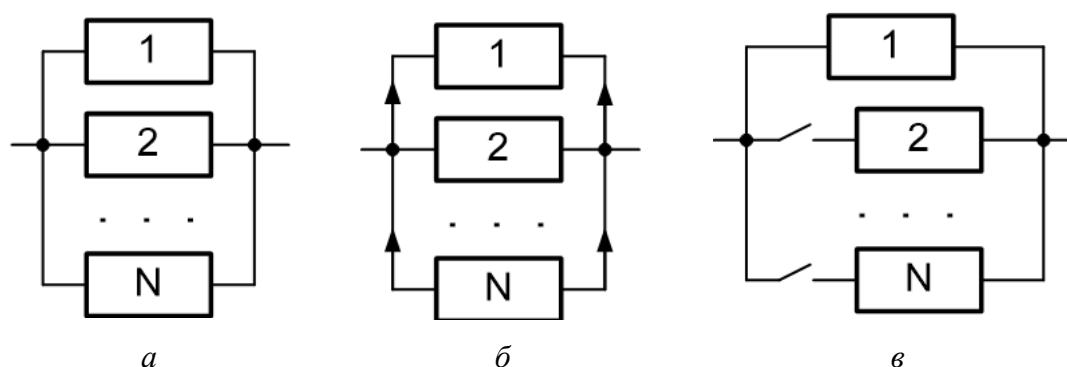


Рис. 4.8. Блок-схемы для различных режимов работы резерва:

a – «горячее» резервирование; *б* – «теплое» резервирование;

в – «холодное» резервирование

В зависимости от возможности восстановления работоспособности резервных элементов после наступления отказа, выделяют резервирование с восстановлением и резервирование без восстановления. Резервирование с восстановлением предполагает наличие механизмов контроля работоспособности элементов, позволяющих своевременно обнаруживать отказы и осуществлять восстановление работоспособности резервных элементов посредством замены или ремонта. Наличие контроля работоспособности особенно важно в системах с резервированием, поскольку количество скрытых отказов может быть существенно выше, чем в системах без резервирования. В идеальном случае, отказ любого элемента объекта должен обнаруживаться немедленно, а восстановление его работоспособности должно производиться в кратчайшие сроки.

4.2. Надежность невосстанавливаемых резервированных объектов

Методика расчета количественных показателей надежности резервированных объектов определяется видом используемого резервирования. Следует отметить, что все представленные математические модели не учитывают влияние надежности переключающих устройств, обеспечивающих перераспределение нагрузки между основными и резервными элементами, на общую надежность системы.

4.2.1. Общее горячее резервирование с целой кратностью

Структурная схема надежности общего горячего резервирования с целой кратностью имеет вид, как представлено на рисунке 4.9.

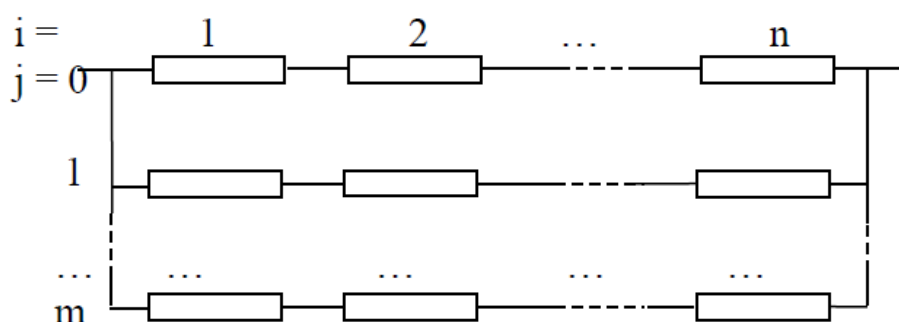


Рис 4.9. Структурная схема общего горячего резервирования

В случае общего горячего резервирования, как основной, так и каждый резервирующий объект имеет идентичную структуру, состоящую из последовательно соединенных элементов. Резервирующие объекты подключаются параллельно основному объекту и между собой, образуя параллельную структуру резервирования.

В каждом объекте с последовательным соединением элементов вероятность безотказной работы определяется на основании выражений (4.2):

$$P_0(t) = \prod_{i=1}^n P_{0i}(t), \quad P_1(t) = \prod_{i=1}^n P_{1i}(t), \quad \dots, \quad P_m(t) = \prod_{i=1}^n P_{mi}(t), \quad (4.2)$$

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

Для определения вероятности безотказной работы системы необходимо использовать следующее соотношение (4.3):

$$P_c(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1}, \quad (4.3)$$

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

В случаях известной постоянной величины интенсивности отказов вероятность безотказной работы системы определяется следующим соотношением (4.4):

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda_o t}]^{m+1}, \quad (4.4)$$

где λ_o – интенсивность отказа основного объекта.

Интенсивность отказа основного объекта Интенсивность отказов резервированного объекта:

$$\lambda_o = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (4.5)$$

Наработка до отказа резервированного объекта определяется следующим соотношением (4.6):

$$T = \frac{1}{\lambda_o} \sum_{j=0}^m \frac{1}{(j+1)}. \quad (4.6)$$

Интенсивность отказов резервированной системы определяется следующим соотношением (4.7):

$$\lambda_c = \frac{(m+1)\lambda_o \times e^{-\lambda_o t} \times (1 - e^{-\lambda_o t})^m}{1 - (1 - e^{-\lambda_o t})^{m+1}} = \frac{(m+1)\lambda_o \times P_o(t) \times Q_o^m(t)}{1 - Q_o^{m+1}(t)}. \quad (4.7)$$

Общее горячее резервирование для невосстанавливаемых объектов дает хороший эффект при малых значениях произведения $\lambda_o t$. Этот вид

резервирования наиболее целесообразно использовать для резервирования достаточно надежных объектов разового использования с коротким временем непрерывной работы.

Общее горячее резервирование для невосстанавливаемых объектов является эффективным методом при условии, что произведение интенсивности отказов основного объекта на заданное время работы имеет малое значение. Данный метод резервирования наиболее целесообразно применять для повышения надежности относительно надежных объектов однократного применения, характеризующихся непродолжительным временем непрерывной работы.

Для определения необходимой кратности резервирования m при общем горячем резервировании необходимо использовать следующее соотношение (4.8):

$$m = \frac{\ln[1 - P_3(t)]}{\ln[1 - P_0(t)]} - 1 = \frac{\ln Q_3(t)}{\ln Q_0} - 1, \quad (4.8)$$

где $P_3(t)$ – заданная надежность (проектная), которую необходимо достигнуть; $P_0(t)$ – надежность основного объекта.

4.2.2. Раздельное горячее резервирование с целой кратностью

Структурная схема надежности раздельного горячего резервирования с целой кратностью имеет вид, как представлено на рисунке 4.10.

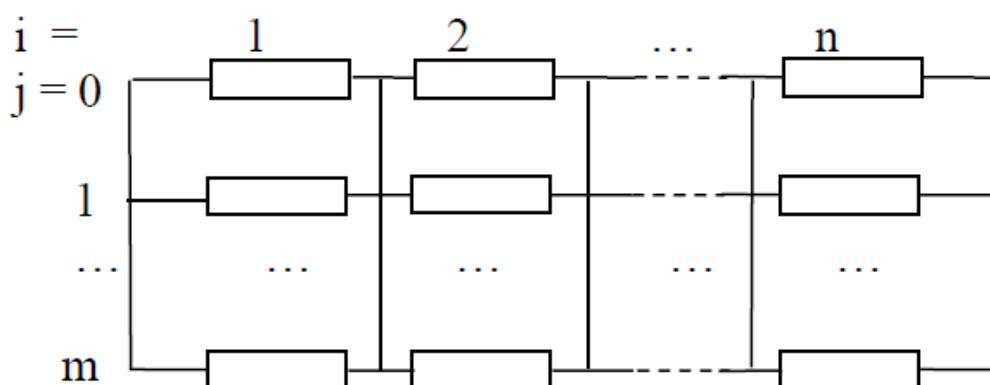


Рис 4.10. Структурная схема общего горячего резервирования

В случае раздельного горячего резервирования основной и каждый резервирующий объект могут иметь как одинаковое, так и различное количество элементов. Характерной особенностью данного подхода является параллельное подключение резервирующих объектов как между собой, так и к соответствующим элементам основного объекта.

Иными словами, каждый i -й элемент основного объекта имеет соответствующий резервирующий элемент, соединенный с ним параллельно. В результате, резервированный объект представляет собой систему из n последовательно соединенных элементов, каждый из которых образован m параллельно соединенными (в смысле обеспечения надежности) элементами.

Для определения вероятности безотказной работы системы необходимо использовать следующее соотношение (4.9):

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n \{1 - [1 - P_i(t)]^{m_i+1}\}, \quad (4.9)$$

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

В случаях одинаковой надежности элементов и кратности резервирования, вероятность безотказной работы всей системы определяется следующим соотношением (4.10):

$$P_C(t) = (1 - [1 - e^{-\lambda_o t}]^{m+1})^n. \quad (4.10)$$

Наработка до отказа резервированного объекта определяется следующим соотношением (4.11):

$$T = \frac{(n-1)!}{\lambda(m+1)} \sum_{j=0}^m \frac{1}{\frac{(j+1)}{(m+1)} \left(\frac{(j+1)}{(m+1)} + 1 \right) \dots \left(\frac{(j+1)}{(m+1)} + n - 1 \right)}. \quad (4.11)$$

Интенсивность отказов резервированной системы определяется следующим соотношением (4.12):

$$\lambda_c = \frac{n(m+1)\lambda \times e^{-\lambda t} \times (1 - e^{-\lambda t})^m}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}} = \frac{n(m+1)\lambda \times P(t) \times Q^m(t)}{1 - Q^{m+1}(t)}. \quad (4.12)$$

При сопоставимых условиях отдельное резервирование обеспечивает более значительное повышение надежности по сравнению с общим резервированием. Данный подход к резервированию целесообразно применять для повышения надежности объектов, характеризующихся сложной структурой (большим количеством элементов) и продолжительным временем эксплуатации. Примерами таких объектов являются системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), системы связи и телекоммуникаций, а также другое оборудование, требующее высокой степени отказоустойчивости и длительного срока службы.

4.2.3. Мажоритарное резервирование

Мажоритарный объект может быть представлен как система с параллельным соединением элементов, характеризующаяся тем, что отказ системы наступает не при отказе всех элементов, а при снижении количества работоспособных элементов до уровня k или ниже (из общего количества n элементов). Таким образом, отказ мажоритарного объекта определяется не полным отказом всех резервированных элементов, а достижением порогового значения количества работоспособных элементов.

В качестве примера структурной схемы надежности при мажоритарном резервировании можно привести мажоритарную систему «2 из 5», представленную на рисунке 4.11. В данной конфигурации система сохраняет работоспособность до тех пор, пока не менее двух из пяти элементов остаются исправными.

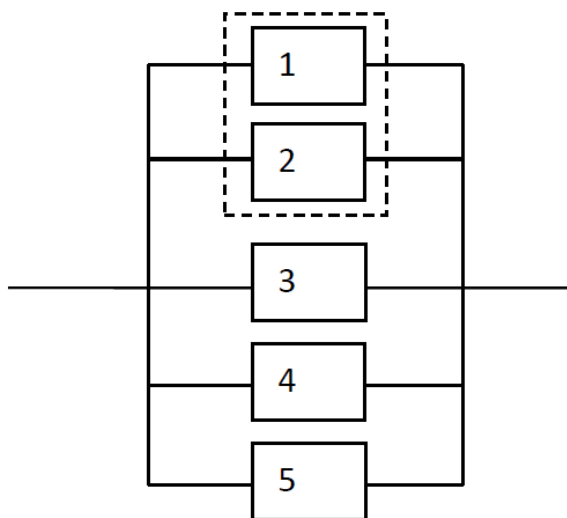


Рис 4.11. Структурная схема мажоритарного резервирования

Рассматриваемая схема мажоритарного резервирования «2 из 5» обеспечивает работоспособность системы в случае, если количество функционирующих элементов составляет два, три, четыре или пять. Другими словами, система сохраняет работоспособность при любой комбинации работоспособных элементов, общее количество которых не менее двух.

Пунктирный контур на рисунке лишь условно выделяет первые два элемента, что не ограничивает применимость схемы к другим возможным комбинациям. Предполагается, что все элементы характеризуются идентичными показателями надежности.

Для количественной оценки надежности мажоритарных объектов, учитывающей все возможные комбинации работоспособных и неработоспособных элементов используется комбинаторный метод.

Вероятность безотказной работы мажоритарной системы « k из n » определяется по следующей формуле (4.13):

$$P_k = C_n^k P^k (1 - P)^{n-k}, \quad (4.13)$$

где P – ВБР одного элемента; $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ – количество сочетаний из n по k .

В условиях, когда все элементы, входящие в состав резервированного объекта, характеризуются идентичными показателями надежности,

математическое ожидание времени безотказной работы объекта (средняя наработка до отказа) определяется выражением (4.14):

$$T_c = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=0}^m \frac{1}{(n+j)}. \quad (4.14)$$

Анализ математического выражения выявляет контринтуитивный результат: средняя наработка до отказа резервированного объекта в некоторых случаях оказывается ниже, чем у аналогичного нерезервированного объекта. Данное явление обусловлено тем, что добавление резервных элементов, пусть и направленное на повышение общей надежности, вносит дополнительный вклад в общую интенсивность отказов системы.

Следовательно, применение резервирования с дробной кратностью ($m < 1$) нецелесообразно для объектов, характеризующихся продолжительным временем непрерывной работы и высокими требованиями к безотказности. В подобных случаях рекомендуется применять другие стратегии резервирования, например, с целой кратностью (дублирование, троирование и т.д.) или сосредоточить усилия на повышении надежности компонентов, составляющих объект.

4.2.4. Общее холодное резервирование с целой кратностью

Общее холодное резервирование предполагает функционирование только основного объекта, в то время как резервные объекты находятся в состоянии ожидания (ненагруженном состоянии) и отсоединены от системы посредством специальных переключающих устройств. Структурная схема, описывающая надежность такой системы, представлена на рисунке 4.12.

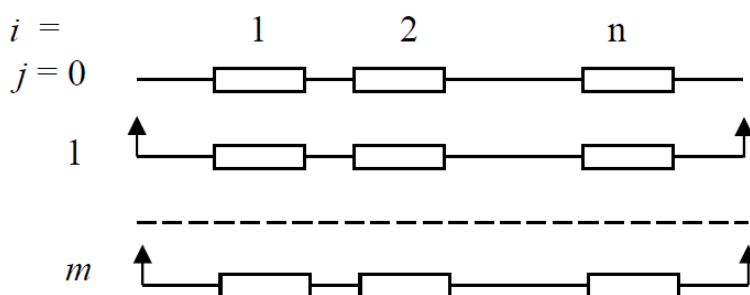


Рис 4.12. Структурная схема общего холодного резервирования с целой кратностью

При наступлении отказа основного объекта производится его отключение от системы и ввод в действие одного из резервных объектов посредством переключающих устройств. Следовательно, отказ резервированной системы происходит только при последовательном отказе основного и всех резервных объектов. При этом делается допущение об абсолютной надежности переключающих устройств, то есть исключается вероятность их отказа.

В соответствии с вышеизложенным, вероятность безотказной работы системы определяется следующим выражением (4.15):

$$P_c(t) = \sum_{j=0}^m P(A_j) = e^{-\lambda_o t} \sum_{j=0}^m P \frac{(\lambda_o t)^j}{j!}. \quad (4.15)$$

Интенсивность отказов системы определяется с использованием следующего выражения (4.16):

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda_o (\lambda_o t)^m}{m! \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda_o t)^j}{j!}}. \quad (4.16)$$

Наработка определяется выражением (4.17):

$$T_c = \frac{m+1}{\lambda_o} = (m+1)T_o. \quad (4.17)$$

Резервирование замещением является эффективным методом в качестве средства повышения надежности объектов, характеризующихся низкой собственной надежностью (в отсутствие резервирования).

При прочих равных условиях, объекты, использующие стратегию «холодного» резервирования, обладают более высокими показателями надежности по сравнению с объектами, использующими «горячее» резервирование.

Наработка до отказа имеет тенденцию к линейному увеличению с ростом кратности резервирования, что отражает прямо пропорциональную зависимость

между количеством резервных элементов и временем безотказной работы системы.

4.2.5. Раздельное холодное резервирование с целой кратностью

Раздельное холодное резервирование с целой кратностью предполагает индивидуальное резервирование каждого элемента системы, при этом количество резервных элементов для каждого основного элемента является целым числом. Соответствующая структурная схема надежности представлена на рисунке 4.13.

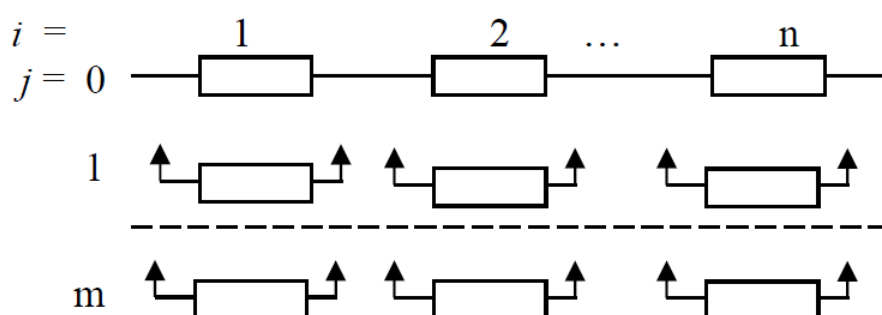


Рис 4.13. Структурная схема общего холодного резервирования с целой кратностью

Вероятность безотказной работы основного объекта при последовательном соединении элементов определяется следующим выражением (4.18):

$$P_o(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (4.18)$$

где $P_i(t)$ – ВБР элементов основного объекта.

В случаях одинаковой надежности элементов вероятность безотказной работы всей системы определяется следующим соотношением (4.19):

$$P_c(t) = e^{-\lambda_o t} \left[\sum_{j=0}^m P \frac{(\lambda_o t)^j}{j!} \right]^n. \quad (4.19)$$

Интенсивность отказов системы определяется с использованием следующего выражения (4.20):

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda_o(\lambda_o t)^m}{m! \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda_o t)^j}{j!}} \quad (4.20)$$

где λ – интенсивность отказов одного элемента.

Наработка определяется выражением (4.21):

$$T_c = \frac{m+1}{\lambda_o} = (m+1)T_o. \quad (4.21)$$

При сопоставимых условиях раздельное резервирование замещением обеспечивает наиболее существенное повышение надежности по сравнению с другими методами резервирования. При этом величина прироста надежности возрастает с увеличением числа элементов в резервируемой системе.

4.2.6. Скользящее резервирование

Скользящее резервирование представляет собой метод повышения надежности группы идентичных (или взаимозаменяемых) элементов объекта за счет использования одного или нескольких резервных элементов. В данной конфигурации отказ объекта наступает в том случае, если количество вышедших из строя основных элементов превышает количество имеющихся резервных элементов. Структурная схема надежности, соответствующая скользящему резервированию, представлена на рисунке 4.14.

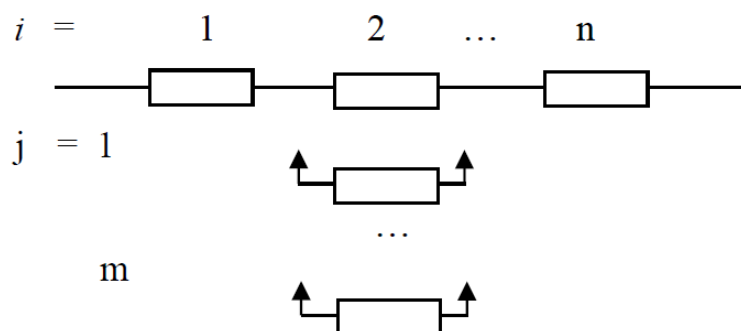


Рис 4.14. Структурная схема скользящего резервирования

Данный вид резервирования применяется в ситуациях, когда все элементы объекта выполняют идентичные функции, что позволяет осуществлять их взаимозаменяемость. Основной объект состоит из n

элементов, а m элементов находятся в состоянии холодного резерва, где $m < n$. При отказе любого из n основных элементов в работу вводится любой из m доступных резервных элементов, заменяя вышедший из строя. Кратность резервирования в данном случае определяется как m/n , характеризую степень резервирования системы.

Вероятность безотказной работы объекта при скользящем резервировании определяется следующим выражением (4.22):

$$P_c(t) = \sum_{j=0}^m P(A_j) = e^{-\lambda_o t} \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda_o t)^j}{j!}. \quad (4.22)$$

Интенсивность отказов системы определяется с использованием выражения (4.23):

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda_o (\lambda_o t)^m}{m! \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda_o t)^j}{j!}}. \quad (4.23)$$

Наработка определяется выражением (4.24):

$$T_c = \frac{m+1}{\lambda_o} = (m+1)T_o. \quad (4.24)$$

С точки зрения обеспечения надежности, скользящее резервирование может демонстрировать сопоставимые характеристики с общим резервированием замещением, однако при этом достигается существенная экономия резервных элементов (в n раз меньше). Вместе с тем, следует учитывать, что реализация скользящего резервирования требует применения более сложных и отказоустойчивых переключающих устройств, что является одним из ключевых факторов, влияющих на общую надежность системы.

4.3. Вопросы для самопроверки

1. Как называется резервирование, выполняемое путем введения дополнительных элементов в структуру объекта, которые выполняют функции основных в случае их отказа?

-
2. Как называется резервирование использующее резервное (свободное) время для выполнения дополнительных функций?
 3. Что такое кратность резервирования? Приведите примеры.
 4. В случае какого вида резервирования, при выходе из строя элемента основной системы включается резервный элемент, дублирующий функции только отказавшего элемента?
 5. Основным параметром, который характеризует схему резервирования является?
 6. В случае какого вида резервирования резервные элементы работают в течение всего времени эксплуатации в одинаковом с основным элементом режиме?
 7. Что происходит с надежностью системы с последовательным соединением в случаях увеличения числа элементов?
 8. В случае какого вида резервирования резервные элементы работают в течение всего времени эксплуатации в одинаковом с основным элементом режиме?
 9. Как называется вид резервирования, когда любой резервный элемент может заменить любой отказавший основной элемент?
 10. Что происходит с надежностью системы с параллельным соединением в случаях увеличения числа элементов?

5. Основы технической диагностики

Современная промышленность характеризуется высокой степенью автоматизации и широким применением сложного и дорогостоящего оборудования. Эффективное функционирование этих технологических систем является критически важным для обеспечения стабильного производства, высокого качества продукции, а также безопасности персонала и окружающей среды. Несвоевременное обнаружение и устранение дефектов и отказов в работе оборудования может привести к значительным экономическим потерям, авариям, а также к негативным социальным и экологическим последствиям. В связи с этим, задача поддержания оборудования в работоспособном состоянии на протяжении всего жизненного цикла приобретает особую актуальность [7-10].

Решение этой задачи невозможно без применения современных методов и средств технической диагностики, позволяющих своевременно выявлять признаки ухудшения технического состояния, прогнозировать остаточный ресурс и принимать обоснованные решения о необходимости проведения технического обслуживания или ремонта.

5.1. Основные понятия и определения

Техническая диагностика (ТД) – это научная дисциплина, охватывающая теорию, методы и средства, предназначенные для определения технического состояния объектов, выявления и идентификации дефектов и отказов, а также прогнозирования их развития. В более широком смысле, техническая диагностика – это комплекс мероприятий, направленных на оценку соответствия состояния объекта установленным требованиям и определение необходимости проведения профилактических или ремонтных работ [2].

Термин «диагностика» происходит от греческого слова «диагнозис», что означает распознавание, определение.

В процессе диагностики устанавливается диагноз, т. е. определяется состояние больного (медицинская диагностика) или состояние технической системы (техническая диагностика).

Технической диагностикой называется область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов [2].

Целями технической диагностики являются [11, 12]:

1. Обеспечение надежности и безопасности эксплуатации технических объектов. Предотвращение внезапных отказов и аварий, которые могут привести к экономическим потерям, травмам персонала и экологическим катастрофам.
2. Повышение эффективности технического обслуживания и ремонта. Переход от планово-предупредительных ремонтов (ППР) к обслуживанию по фактическому состоянию, что позволяет сократить затраты на обслуживание и ремонт, а также увеличить срок службы оборудования.
3. Оптимизация режимов эксплуатации оборудования. Обеспечение работы оборудования в оптимальном режиме, что позволяет повысить его производительность и снизить энергопотребление.
4. Оценка качества проектирования и изготовления оборудования. Анализ причин возникновения дефектов и отказов для выявления слабых мест в конструкции и технологических процессах.

Для достижения поставленных целей, техническая диагностика решает следующие основные задачи:

1. Обнаружение дефекта (качественная диагностика). Установление факта наличия или отсутствия дефекта в объекте диагностирования. Результатом является бинарное решение: «исправен» или «неисправен». Пример: Определение, что уровень вибрации насоса превышает допустимое значение.
2. Определение местоположения дефекта (локализация). Установление места расположения дефектного элемента или узла в объекте диагностирования. Пример: Определение, что повышенная вибрация исходит от подшипника электродвигателя насоса.

3. Определение вида дефекта (идентификация). Установление типа дефекта, его характеристик и причин возникновения. Пример: Определение, что причиной повышенной вибрации подшипника является разрушение сепаратора.
4. Оценка технического состояния (количественная диагностика). Определение степени износа, повреждения или отклонения параметров технического состояния объекта от нормы. Пример: Оценка степени износа подшипника по величине вибрации или по результатам анализа смазочного масла.
5. Прогнозирование технического состояния (прогнозирование). Определение времени, оставшегося до достижения объектом предельного состояния или отказа, на основе анализа текущего технического состояния и прогнозирования скорости его изменения. Пример: Прогнозирование выхода из строя подшипника при наработке 1000 часов на основе анализа динамики изменения вибрации подшипникового узла.

Для успешного применения методов и средств технической диагностики необходимо четкое понимание следующих основных понятий и терминов:

Объект диагностирования - техническое устройство, система или процесс, подлежащий технической диагностике. Примером является: насос, электродвигатель, редуктор, система управления.

Техническое состояние (ТС) - совокупность, подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации, признаков, свойственных объекту в данный момент времени, устанавливаемая технической диагностикой на основе заданных признаков и характеризующаяся определенными значениями параметров.

Параметр технического состояния - количественная или качественная характеристика объекта, отражающая его техническое состояние (например, температура, давление, вибрация, зазор, расход, напряжение, ток).

Дефект - несоответствие объекта требованиям технической документации, не влияющее на его работоспособность.

Отказ - событие, заключающееся в утрате объектом работоспособного состояния.

Диагностический параметр - параметр технического состояния, используемый для проведения технической диагностики.

Диагностический признак - характерное изменение диагностического параметра, указывающее на наличие дефекта или ухудшение технического состояния объекта.

Результатом выполнения операций технического диагностирования является классификация текущего состояния объекта. Объект диагностирования может находиться в одном из следующих возможных технических состояний (рис. 5.1):

1. исправное или неисправное;
2. работоспособное или неработоспособное;
3. состояние правильного или неправильного функционирования.

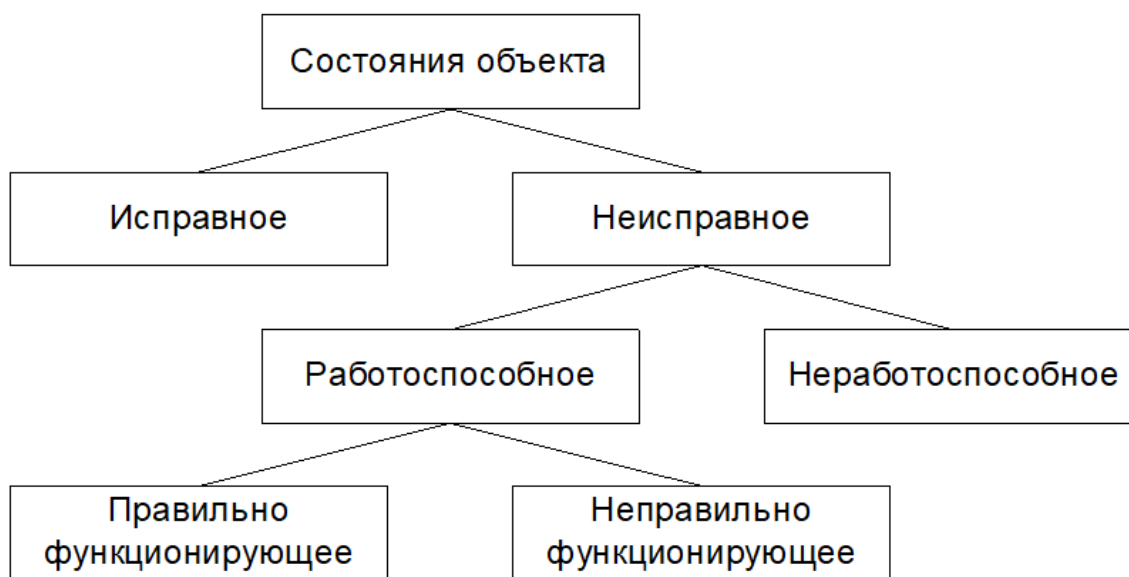


Рис 5.1. Возможные состояния технических систем

Объект, соответствующий всем требованиям нормативно-технической документации, определяется как исправный, и находится в исправном техническом состоянии. Работоспособным считается объект, обеспечивающий выполнение заданных функций с параметрами, находящимися в установленных пределах; он пребывает в работоспособном состоянии.

Неисправным является объект, имеющий хотя бы один дефект, под которым понимается любое несоответствие свойств объекта заданным требованиям. При этом неисправный объект может находиться как в работоспособном, так и в неработоспособном состоянии.

Повреждением называется переход объекта из исправного в работоспособное состояние. Отказом является переход работоспособного объекта в неработоспособное состояние.

Правильное функционирование объекта характеризуется нахождением его параметров в пределах установленных допусков. Объект может находиться в неисправном состоянии, но при этом функционировать неправильно.

Поддержание работоспособного состояния (как минимум) является основной задачей в условиях эксплуатации, реализуемой посредством системы технического обслуживания (ТО) и ремонтов. ТО включает в себя мониторинг состояния оборудования и проведение профилактических мероприятий, направленных на поддержание исправности или работоспособности. Ремонт предназначен для восстановления исправности или работоспособности объекта.

Техническая диагностика играет ключевую роль в обеспечении надежности и безопасности эксплуатации промышленного оборудования. Своевременное выявление и устранение дефектов позволяет [12]:

1. Предотвратить внезапные отказы оборудования за счет использования перехода от реактивного подхода к обслуживанию (ремонт после отказа) к проактивному (выявление и устранение дефектов на ранней стадии).
2. Снизить риск аварий и травм за счет предотвращения аварийных ситуаций, связанных с отказом оборудования, которые могут привести к травмам персонала и повреждению имущества.
3. Увеличить срок службы оборудования за счёт поддержания оборудования в оптимальном техническом состоянии, что позволяет продлить срок его службы и снизить затраты на замену.
4. Оптимизировать затраты на техническое обслуживание и ремонт. Сделать возможным планирование технического обслуживания и ремонтов на основе

фактического состояния оборудования, что позволит избежать необоснованных затрат на проведение работ, которые не являются необходимыми.

5. Повысить эффективность производства за счёт сокращения времени простоя оборудования и увеличения производительности.

5.2. Технический контроль в задачах диагностики

В основе технической диагностики лежат результаты анализа физических процессов, протекающих в изделии, а также методы, разработанные в рамках теории надежности, теории измерений и теории информации. Диагностика использует данные, полученные в ходе **технического контроля** – процедуры проверки соответствия продукции или процесса установленным техническим требованиям.

Технический контроль реализуется на различных этапах жизненного цикла изделия, при этом особую значимость приобретает эксплуатационный контроль, включающий следующие этапы:

1. Мониторинг параметров функционирования изделия с использованием штатных средств измерений.
2. Периодическую проверку корректности работы изделия на основе показаний штатных сигнализаторов.
3. Обнаружение отклонений в функционировании изделия с применением штатных средств контроля.
4. Проведение диагностики технического состояния изделия с использованием специализированных диагностических алгоритмов, основанных на анализе контрольно-измерительной информации.

Основными задачами контроля и диагностики являются:

1. Обеспечение контролепригодности объекта на этапе проектирования.
2. Разработка комплекса средств технического контроля, адаптированных к особенностям объекта.
3. Разработка методик обработки и анализа контрольно-измерительной информации с целью выявления признаков дефектов.

4. Оптимизация способов представления диагностической информации для облегчения принятия решений.
5. Формирование рекомендаций по использованию результатов контроля и диагностики для принятия обоснованных решений по техническому обслуживанию и ремонту.

Процессы обнаружения и локализации дефектов, осуществляемые в рамках определения технического состояния объекта, объединяются термином «**диагностирование**». Целью диагностирования является проверка соответствия объекта критериям исправности, работоспособности и правильного функционирования, а также обнаружение и локализация дефектов.

Эффективное решение задач диагностирования предполагает определение классов возможных дефектов и наличие формализованных методов построения алгоритмов диагностирования. Для оценки технического состояния объекта применяются **технические средства диагностики**, которые могут быть реализованы аппаратно или программно. Совокупность средств диагностики и объекта диагностирования образует **систему диагностирования**.

Существуют системы тестового и функционального диагностирования. **Системы тестового диагностирования** подразумевают воздействие на объект специально сформированными тестовыми сигналами с последующим анализом отклика. **Системы функционального диагностирования** используют для анализа только рабочие сигналы, возникающие в процессе нормального функционирования объекта.

Процесс диагностики объекта осуществляется в соответствии с заранее разработанным **алгоритмом диагностирования**, определяющим объем, последовательность и взаимосвязь диагностических процедур. Алгоритм диагностирования состоит из элементарных проверок объекта и правил, определяющих последовательность их выполнения, а также правил анализа полученных результатов. Основой для разработки алгоритма служит **диагностическая модель объекта**.

Результатом диагностирования является диагноз, содержащий информацию о текущем состоянии объекта, наличии дефектов и их локализации.

Система тестового диагностирования классифицируется как система управления, в то время как система функционального диагностирования относится к системам контроля.

Процесс диагностирования требует использования формализованной модели объекта – представления его характеристик в аналитической, графической, табличной или иной форме. Различают явные и неявные модели: **явная модель** содержит описание как исправного состояния объекта, так и всех возможных неисправных состояний; **неявная модель** включает в себя только описание исправного состояния.

Диагностическая модель разрабатывается на основе анализа схемно-технических решений объекта и опыта его эксплуатации и включает в себя:

1. Классификацию возможных дефектов, структурированную по типам и причинам возникновения.
2. Идентифицируемые признаки, указывающие на наличие конкретных дефектов.
3. Методы обнаружения и измерения этих признаков.

Проявление дефектов выражается в изменении значений наблюдаемых параметров объекта. В связи с этим, ключевым этапом является определение **диагностических параметров** и установление их количественной или качественной взаимосвязи с наличием и степенью развития дефекта. Значения диагностических параметров, полученные в результате испытаний, позволяют оценить техническое состояние объекта в текущий момент времени. Качество диагностирования напрямую зависит от адекватного выбора диагностических признаков, отражающих состояние объекта.

Для классификации объекта по состоянию требуется установление предельных значений диагностических параметров. Превышение параметром установленных пределов является индикатором наличия дефекта. В процессе

диагностирования необходимо учитывать динамику развития дефекта, чтобы предотвратить переход объекта в неработоспособное состояние до следующего планового контроля.

Диагностические модели классифицируются на структурные и функциональные. **Структурные модели** предназначены для локализации дефектов, в то время как **функциональные модели** описывают принципы функционирования объекта. Модели могут быть детерминированными и вероятностными, отражая соответственно детерминированный или статистический характер связей между параметрами и состоянием объекта. На основе диагностической модели разрабатывается алгоритм диагностирования, представляющий собой совокупность элементарных проверок, направленных на выявление дефектов.

Комплекс технических средств, используемых для диагностирования состояния объекта, представлен на рисунке 5.2. Основу этого комплекса составляют контрольно-измерительные средства, обеспечивающие получение информации о диагностических параметрах объекта.

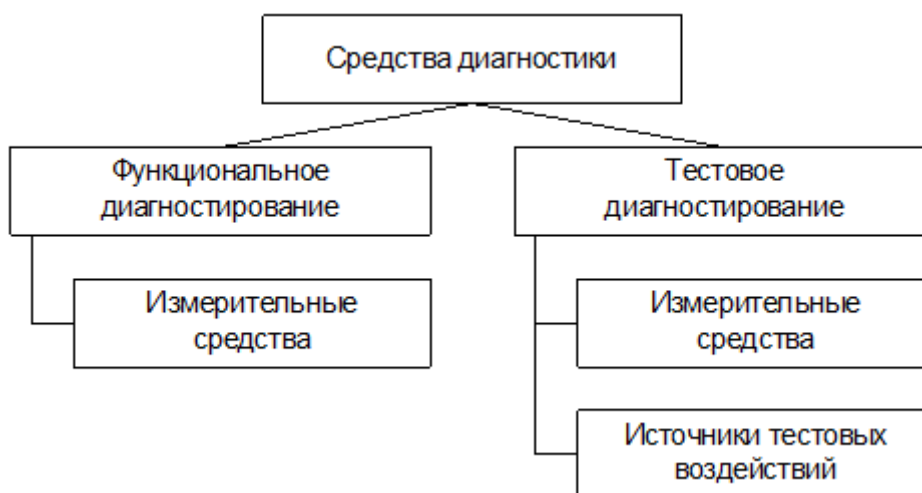


Рис 5.2. Средства диагностики

Методы диагностирования подразделяются на функциональные, при которых анализируется реакция объекта на штатные рабочие воздействия, и

тестовые, предусматривающие подачу на объект специально сформированных тестовых воздействий.

Важной характеристикой объекта диагностирования является **контролепригодность** – свойство, определяющее его приспособленность к проведению контроля с использованием заданных средств.

Уровень контролепригодности непосредственно влияет на эффективность решения задач тестового контроля. Обеспечение контролепригодности достигается путем модификации структуры проверяемого объекта, направленной на оптимизацию процесса диагностирования. В частности, возможно введение в состав объекта дополнительной аппаратуры или организация дополнительных контрольных точек, доступных для проведения измерений.

5.3. Методы и средства технической диагностики

Эффективность технической диагностики во многом определяется выбором правильных методов и средств, позволяющих получить необходимую информацию о техническом состоянии объекта. Разнообразие технических объектов, задач диагностирования и условий эксплуатации обуславливает существование большого количества методов и средств технической диагностики, отличающихся принципами действия, чувствительностью, точностью и стоимостью.

Все методы технического диагностирования разделяются на субъективные (органолептические) и объективные (приборные).

Органолептические методы.

Органолептические методы технической диагностики основаны на анализе информации, воспринимаемой органами чувств человека (зрение, обоняние, осязание, слух) без использования технических измерительных средств. В основе метода лежат субъективные ощущения, генерируемые органами чувств, что обуславливает зависимость точности от квалификации и опыта персонала, проводящего диагностирование.

В ходе органолептического контроля допускается применение технических средств, повышающих разрешающую способность или восприимчивость органов чувств (например, лупы, микроскопы, стетоскопы), при условии, что они не являются измерительными.

Решение о соответствии объекта заданным требованиям принимается на основе диагностических правил типа «если – то», определяющих соответствие или несоответствие состояния объекта критериям работоспособности. Как правило, результатом является бинарная оценка состояния («соответствует» или «не соответствует»).

Основной целью органолептического контроля является обнаружение отклонений от нормального функционирования объекта. Решение о необходимости остановки оборудования для проведения углубленного визуального осмотра и ремонта, продолжении эксплуатации или применении приборных методов диагностирования принимается технологическим или ремонтным персоналом на основании опыта и анализа производственной ситуации.

Несмотря на субъективный характер метода, практический опыт подтверждает незаменимость специалиста, обладающего глубоким знанием особенностей эксплуатации и ремонта оборудования. Органолептический метод, не регламентированный стандартами, является первым этапом диагностирования, широко используемым в практике технического обслуживания.

Органолептическая оценка технического состояния механического оборудования основывается на следующих основных методах:

1. Анализ акустических характеристик.

1.1. Акустическое восприятие. Субъективная оценка звукового сопровождения работы механизма с целью выявления наиболее значимых дефектов, приводящих к изменению акустической картины (например, повреждения муфт, дисбаланс, ослабление посадок, обрыв стержней ротора).

Диагностическими признаками являются изменения тональности, ритма и громкости звука.

1.2. Анализ механических колебаний. Преобразование механических колебаний корпусных деталей в звуковые колебания с использованием технических или электронных стетоскопов для повышения чувствительности восприятия.

2. Термометрический контроль. Оценка степени нагрева корпусных деталей на основе субъективных ощущений: «холодно» (температура менее +20 °С), «тепло» (температура +30...40 °С), «горячо» (температура свыше +50 °С). Предельной температурой для непосредственного восприятия тыльной стороной ладони является +60 °С (без болевых ощущений в течение 5 с). Для контроля более высоких температур (+70...+100 °С) используются косвенные методы (например, оценка интенсивности испарения воды). Категорически запрещается прикосновение к вращающимся и токоведущим деталям.

3. Тактильный анализ вибрации. Оценка интенсивности вибрации на основе субъективных ощущений. Данный метод позволяет проводить лишь сравнительный анализ вибрации, поскольку абсолютная оценка подвержена значительным погрешностям вследствие индивидуальных особенностей восприятия и широкого спектрального состава вибрации. Чувствительность к вибрации снижается в высокочастотном диапазоне.

4. Визуальный контроль. Осмотр механизма с целью выявления видимых дефектов (трещин, деформаций, коррозии, утечек и т.п.). Проводится в динамическом (при работающем механизме) и статическом (при остановленном механизме) режимах.

5. Тактильная оценка свойств материалов и поверхностей. Оценка волнистости, шероховатости, качества смазочного материала (вязкости, пластичности, наличия загрязнений), шероховатости поврежденных деталей на основе тактильных ощущений.

Приборные методы.

Наряду с органолептическими методами, в технической диагностике применяются приборные методы, обеспечивающие получение количественных оценок измеряемых параметров. Диагностирование с использованием приборных методов основано на преобразовании изменений состояния объекта в электрические, световые или звуковые сигналы, доступные для анализа.

В зависимости от физической природы измеряемых параметров выделяют следующие основные приборные методы:

1. Механический метод. Основан на измерении геометрических размеров, зазоров в сопряжениях, давлений и скорости перемещения элементов. Применяется для количественной оценки износа деталей, определения люфтов и зазоров в сопряжениях, контроля давления в гидро- и пневмосистемах, измерения усилий затяжки резьбовых соединений, определения номинальной скорости привода. Для реализации метода используется разнообразный мерительный инструмент: линейки, штангенциркули, щупы, шаблоны, индикаторы перемещения часового типа, динамометрические ключи, ключи предельного момента, манометры.

2. Электрический метод (ваттметрия). Основан на измерении электрических параметров (сила тока, напряжение, мощность, сопротивление и др.) и позволяет по косвенным признакам оценить техническое состояние механизма. Используются амперметры, вольтметры, измерительные мосты, датчики перемещений, датчики крутящего момента, датчики давления, тахогенераторы, термопары.

3. Тепловой метод (термометрия). Основан на измерении температурных параметров объекта диагностирования и позволяет определять деформации, вызванные неравномерным нагревом, оценивать состояние подшипниковых узлов, смазочных систем, тормозных устройств, муфт. Используются термосопротивления, термометры, термопары, термоиндикаторы, термокраски, тепловизоры.

4. Виброакустические методы (виброметрия). Основаны на измерении параметров упругих колебаний, возникающих в узлах и деталях в процессе работы механизма, и позволяют оценивать общее состояние оборудования, выявлять и отслеживать развитие дефектов. Используются шумомеры, виброметры, спектроанализаторы параметров виброакустического сигнала.

5. Методы анализа смазки (трибодиагностика). Основаны на определении типа и концентрации продуктов изнашивания, присутствующих в смазочном материале, и позволяют оценить интенсивность износа сопряженных деталей. Реализуются различными способами: колориметрическим, полярографическим, магнитно-индукционным, радиоактивным, спектрографическим.

6. Методы неразрушающего контроля. Магнитные, вихретоковые, ультразвуковые методы и методы, основанные на применении проникающих веществ, радиационные и радиоволновые методы, предназначенные для выявления дефектов и оценки целостности деталей механизма без их разрушения.

Классификация диагностических приборов.

Существуют различные классификации диагностических приборов, основанные на разных признаках: тип представления информации (цифровой/аналоговый), функциональность (показывающие/сигнализирующие), область применения (универсальные/специализированные), способ установки (стационарные/переносные) и др.

Однако, для целей технического диагностирования механического оборудования, все средства диагностики можно разделить на три основные категории, различающиеся по уровню решаемых задач и особенностям аппаратной реализации: портативные, анализаторы и стационарные системы.

Портативные средства предназначены для измерения ограниченного набора диагностических параметров и характеризуются компактностью, автономностью и отсутствием возможности передачи данных в системы

верхнего уровня (рис. 5.3). Преимуществами портативных средств являются высокая скорость проведения измерений, простота эксплуатации и обслуживания, наглядность представления результатов в виде дискретных значений и низкая стоимость. Область применения – оперативный контроль технического состояния оборудования ремонтным и технологическим персоналом.



Рис 5.3. Пример портативных средств технической диагностики:

а – тахометр; *б* – виброметр; *в* – пирометр

Анализаторы представляют собой класс средств технического диагностирования, обеспечивающих не только измерение, но и углубленный анализ диагностических параметров. Это позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях их развития. К данному классу относятся спектроанализаторы вибрации, тепловизоры и анализаторы напряжения (рис. 5.4).

В типичной конфигурации портативное устройство используется для сбора и предварительной обработки данных, в то время как компьютер с специализированным программным обеспечением обеспечивает выполнение более сложных аналитических процедур, включающих анализ трендов и применение экспертных систем.



Рис 5.4. Пример приборов-анализаторов:

а – виброанализатор; *б* – тепловизор; *в* – анализатор напряжения

Применение анализаторов целесообразно в условиях специализации процессов контроля, наличия высококвалифицированного персонала и повышенных требований к качеству проводимых измерений. Областью применения являются специализированные подразделения промышленных предприятий, занимающиеся экспертной оценкой технического состояния и наладкой механического оборудования.

Стационарные системы технического диагностирования предназначены для непрерывного мониторинга технического состояния оборудования и обеспечения его защиты от нештатных режимов работы. Основными задачами встроенных систем являются: обеспечение защиты оборудования, непрерывный мониторинг технического состояния, диагностирование текущего состояния оборудования и использование комплекса диагностических параметров.

Примером стационарной системы технического диагностирования является система вибро-ударозащиты (СВУЗ) и диагностики мотор-шпинделей обрабатывающих центров, разработанная в Иркутском национальном исследовательском техническом университете [13,14]. Структурная схема СВУЗ представлена на рисунке 5.5.

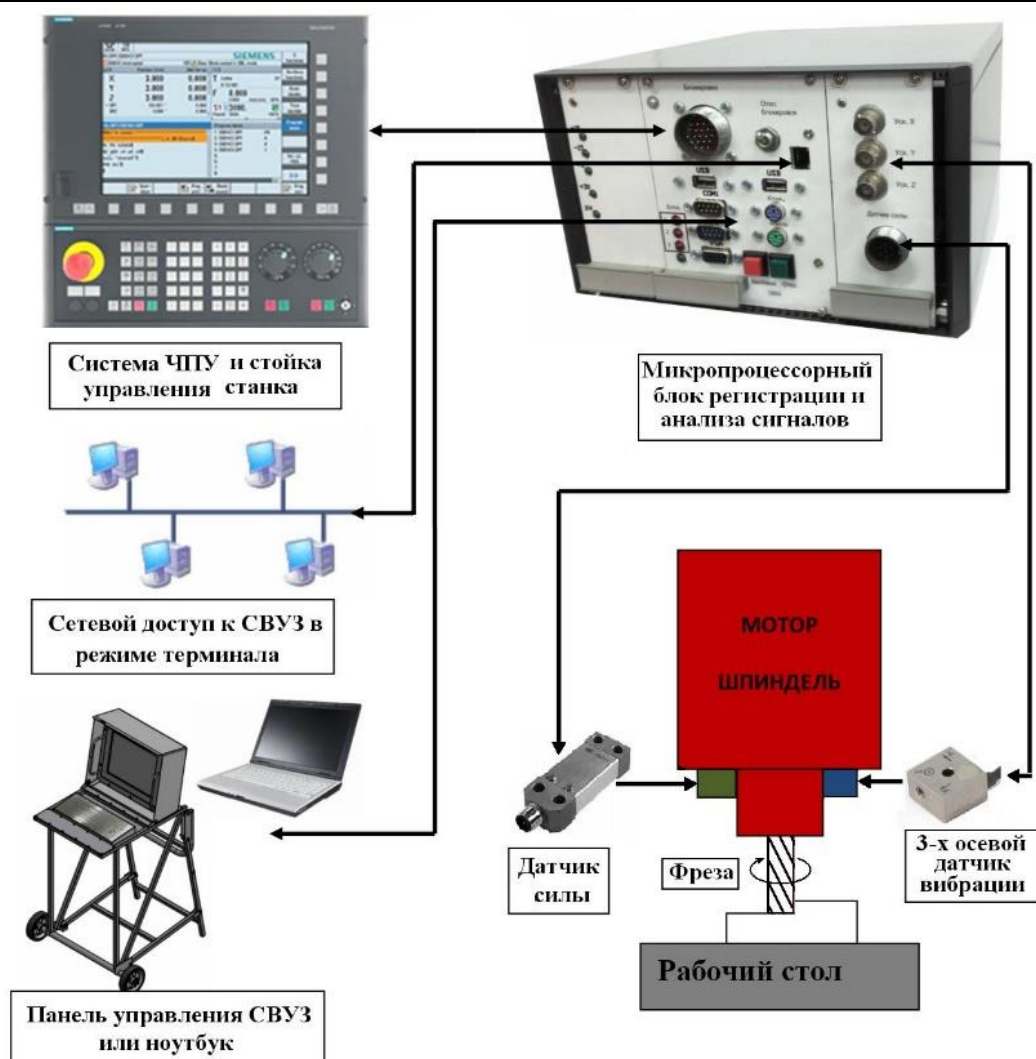


Рис 5.5. Структурная схема стационарной системы вибро-ударозащиты и диагностики мотор-шпинделей обрабатывающих центров

СВУЗ позволяет защищать станки (обрабатывающие центры) от опасных динамических воздействий, возникающих при механообработке, постоянно осуществлять мониторинг среднеквадратического значения (СКЗ) виброускорения и диагностику текущего технического состояния станка с использованием каналов обратной связи по уровням вибрации и силовым воздействиям на инструмент.

Система измеряет и регистрирует в реальном времени уровень пространственной вибрации и силы резания на шпинделе обрабатывающего центра (ОЦ) по трем каналам виброускорения и одному каналу силы фрезерования в зоне крепления инструмента.

Управляющими воздействиями при этом являются:

1. Отключение станка при заданных уровнях предельных ударных воздействий, передающихся на шпиндель в результате неисправности станка или поломки инструмента, сбоях управляющих программ, ошибках оператора.
2. Предупреждение (выдается на стойку управления станка), уменьшение подачи или отключение работающего станка при возникновении опасной вибрации и превышении заданных значений СКЗ виброускорений при постепенном развитии дефектов станка, износе инструмента, нерациональных или резонансных режимах обработки деталей.

Ключевыми направлениями развития стационарных систем являются: расширение перечня контролируемых диагностических параметров, использование персональных компьютеров для обработки больших объемов однотипной информации, реализация модульного принципа построения для обеспечения гибкости и масштабируемости, повышение универсальности для адаптации к различным типам оборудования.

В целом, применение стационарных систем технической диагностики является перспективным направлением развития систем технического обслуживания и ремонта. Совершенствование технологий, снижение стоимости оборудования и развитие программного обеспечения позволяют расширять область применения стационарных систем и делать их более доступными для предприятий различных отраслей промышленности. В будущем можно ожидать широкого распространения интегрированных систем технической диагностики, объединяющих данные, полученные с использованием стационарных, портативных и мобильных средств контроля, а также данных, поступающих от датчиков, встроенных в оборудование.

5.4. Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение термина «Техническая диагностика».
2. Что изучает техническая диагностика как наука?
3. Какие цели и задачи решает техническая диагностика?
4. В каких состояниях может находиться технический объект?

-
5. Что такое технический контроль?
 6. В чём заключается основное отличие органолептических и приборных методов диагностирования?
 7. Перечислите органолептические методы диагностирования, их достоинства и недостатки.
 8. Какие приборные методы используются для диагностирования механического оборудования?
 9. Приведите примеры объектов диагностирования при использовании механических и электрических методов диагностирования.
 10. Для каких объектов диагностирования применяют вибрационные и тепловые методы диагностирования?
 11. Какие задачи диагностирования решаются при использовании анализа смазки и неразрушающего контроля?
 12. Назначение, особенности и область применения портативных средств диагностирования.
 13. Основные особенности и область применения анализаторов при диагностировании механического оборудования.
 14. Классификационные признаки диагностических приборов.
 15. Для чего и когда устанавливают стационарные системы вибрационного контроля механизмов и машин?

Заключение

Данное учебное пособие предоставляет читателям возможность приобрести необходимые теоретические знания и практические навыки для решения задач, связанных с обеспечением надежности и диагностикой технологических систем. Изученные методы расчета надежности, анализа структурной надежности, резервирования и технической диагностики позволяют инженерам и специалистам принимать обоснованные решения при проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании оборудования. Важно отметить, что эффективность применения представленных методов напрямую зависит от глубокого понимания особенностей конкретной технологической системы, а также от грамотного использования современных средств контроля и диагностики. Освоение материала данного пособия является важным шагом на пути к повышению квалификации специалистов, способных обеспечить надежную и эффективную работу технологических систем различного назначения.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.
2. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения.
3. ГОСТ 27.004-85 Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения.
4. Дружинин, Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем / Г.В. Дружинин. – 4-е изд., перераб. и доп. –М. : Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
5. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А.М. Дальский. – М. : Машиностроение, 1975. – 223 с.
6. Труханов В.М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.
7. Дианов, В.Н. Диагностика и надежность автоматических систем : учеб. пособие / В.Н. Дианов. – 3-е изд. ; стер. –М. : МГИУ, 2007. – 160 с.
8. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : URSS, 2019. – 240 с.
9. Богдан, Н. В. Техническая диагностика гидросистем / Н. В. Богдан, М. И. Жилевич, Л. Г. Красневский. – Минск : Белавтотракторостроение, 2000. – 120 с.
10. Синопальников, В.А. Надежность и диагностика технологических систем : учеб. / В.А. Синопальников, С.Н. Григорьев. – М. : Высш. шк., 2005. – 343 с.
11. Технические средства диагностирования. Справочник / В.В. Ключев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
12. Карташевич, А.Н. Техническое диагностирование машин / А.Н. Карташевич, Г.Н. Сапьяник, А.Ф. Скадорва. Горки : БГСА, 2009.

13. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Портной А.Ю. Система защиты обрабатывающих центров от опасных динамических нагрузок на основе анализа параметров вибрации и силы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 4 (123). С. 30-38.

14. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатывающих центров // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 2 (97). С. 28-35.

Алейников Дмитрий Павлович

Надежность и диагностика технологических систем

Учебное пособие издано в авторской редакции

Сетевое издание

Ответственный за выпуск – Алимova Н.К.

Учебное издание

Системные требования:

операционная система Windows XP или новее, macOS 10.12 или новее, Linux.

Программное обеспечение для чтения файлов PDF.

Объем данных 3 Мб

Принято к публикации «24» мая 2025 года

Режим доступа: <https://izd-mn.com/PDF/27MNNPU25.pdf> свободный. – Загл. с экрана. –
Яз. рус., англ.

ООО «Издательство «Мир науки»

«Publishing company «World of science», LLC

Адрес:

Юридический адрес — 127055, г. Москва, пер. Порядковый, д. 21, офис 401.

Почтовый адрес — 127055, г. Москва, пер. Порядковый, д. 21, офис 401.

<https://izd-mn.com/>

**ДАННОЕ ИЗДАНИЕ ПРЕДНАЗНАЧЕНО ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ НА
ЭЛЕКТРОННЫХ НОСИТЕЛЯХ**