

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионально образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

**А.С. Ширшиков, В.В. Лянденбургский,  
А.М. Белоковылский**

## **ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Допущено УМО вузов РФ по образованию  
в области транспортных машин и транспортно-технологических  
комплексов в качестве учебного пособия для студентов вузов,  
обучающихся по направлению подготовки бакалавров  
«Технология транспортных процессов»,  
(профили подготовки: «Организация и безопасность движения», «Расследование и  
экспертиза дорожно-транспортных происшествий»)

Пенза 2015

УДК 629.3.004.1(075.8)

ББК 30.14+30.82я73

Ш64

Рецензенты: доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики В.В. Коновалов (ПГТУ); кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация и безопасность движения» И.Е. Ильина (ПГУАС)

**Ширшиков А.С.**

Ш64 Оценка надежности технических систем: учеб. пособие / А.С. Ширшиков, В.В. Лянденбургский, А.М. Белоковылский. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 240 с.  
**ISBN 978-5-9282-1318-3**

Изложены основные положения теории надёжности применительно к автомобильному транспорту.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Организация и безопасность движения» и предназначено для использования студентами, обучающимися по направлению подготовки бакалавров «Технология транспортных процессов», при изучении дисциплины «Оценка надежности технических систем».

**ISBN 978-5-9282-1318-3**

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2015

© Ширшиков А.С., Лянденбургский В.В., Белоковылский А.М., 2015

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Для повышения качества работы технических средств, в частности автомобилей и технических средств организации дорожного движения, снижения стоимости их обслуживания необходимо добиться обеспечения оптимальной надежности этих средств. На решение данных задач направлено развитие и совершенствование теории и практики расчета и экспериментального определения надежности.

Учебное пособие написано в соответствии с программой дисциплины «Оценка надежности технических систем» для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Технология транспортных процессов», на основе опыта ее преподавания в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства. В учебном пособии изложены основы теории надежности. В отличие от учебников по этому курсу данное учебное пособие содержит только необходимый материал в рамках указанной выше программы. Для оценки полученных знаний в пособии имеются контрольные вопросы и задачи. Освоение учебного материала, изложенного в учебном пособии, позволит студенту сформировать компетенцию «Способность применять систему фундаментальных знаний (математических, естественнонаучных, инженерных и экономических) для идентификации, формулирования и решения технических и технологических проблем в области технологии, организации, планирования и управления технической и коммерческой эксплуатацией транспортных систем» в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 23.03.01 Технология транспортных процессов (уровень бакалавриата).

Изучение теории надежности базируется на знании теории вероятностей и математической статистики. Знания, полученные при изучении курса, необходимы при усвоении дисциплины "Конструктивная и эксплуатационная надежность подвижного состава".

Авторы выражают благодарность за ценные замечания и советы рецензентам книги.

## ВВЕДЕНИЕ

Закономерности возникновения и устранения отказов объектов изучает такая научная дисциплина, как теория надежности. В частности она охватывает:

- критерии и характеристики надежности;
- методы анализа надежности;
- методы синтеза сложных систем по критериям надежности;
- методы повышения надежности;
- методы испытаний объектов на надежность;
- методы эксплуатации объектов с учетом их надежности.

Теория надежности является прикладной технической наукой. Она изучает общие закономерности, которых следует придерживаться при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации объектов для получения максимальной эффективности и безопасности их использования.

В теории надежности исследуются закономерности возникновения отказов объектов, восстановления их работоспособности, рассматривается влияние внешних и внутренних воздействий на процессы, происходящие в объектах, разрабатываются методы расчета систем на надежность, прогнозирования отказов, изыскиваются способы повышения надежности при проектировании и эксплуатации объектов, а также способы сохранения надежности при эксплуатации, определяются методы сбора, учета и анализа статистических данных, характеризующих надежность.

В теории надежности вводятся показатели надежности объектов, устанавливается связь между ними и их экономической эффективностью и безопасностью, обосновываются требования к надежности с учетом различных факторов, разрабатываются рекомендации по обеспечению заданных требований к техническим объектам на этапах их проектирования, изготовления, испытаний, хранения и эксплуатации, решаются эксплуатационные задачи надежности (обоснование сроков и объема профилактических мероприятий и ремонтов, обеспечение запасными элементами, узлами, инструментом и материалами, диагностический контроль и отыскание неисправностей и т.д.).

# 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

## 1.1. Основные термины, понятия и определения теории надежности

Надежность технического объекта определяется его конструкцией, технологией изготовления и условиями применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Техническое обслуживание включает регламентированные в конструкторской (проектной) и (или) эксплуатационной документации операции по поддержанию работоспособного и исправного состояния. В техническое обслуживание входят контроль технического состояния, очистка, смазывание и т.п.

Восстановление включает в себя идентификацию отказа (определение его места и характера), наладку или замену отказавшего элемента, регулирование и контроль технического состояния элементов объекта и заключительную операцию контроля работоспособности объекта в целом.

Перевод объекта из предельного состояния в работоспособное состояние осуществляется с помощью ремонта, при котором происходит восстановление ресурса объекта в целом. В ремонт могут входить разборка, дефектовка, замена или восстановление отдельных блоков, деталей и сборочных единиц, сборка и т.д. Содержание отдельных операций ремонта может совпадать с содержанием операций технического обслуживания.

*Надежность* – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях – условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования. Существует и другое определение надежности: надежность – свойство объекта сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Это определение применяют тогда, когда параметрическое описание нецелесообразно (например для простейших объектов, работоспособность которых характеризуется по типу «да-нет») или невозможно (например для систем «машина – оператор», т.е. таких систем, не все свойства которых могут быть характеризованы количественно).

К параметрам, характеризующим способность выполнять требуемые функции, относят кинематические и динамические параметры, показатели конструкционной прочности, показатели точности функционирования, производительности, скорости и т.п. С течением времени значения этих параметров могут изменяться.

*Расчет надежности*: процедура определения значений показателей надежности объекта с использованием методов, основанных на их вычисле-

нии по справочным данным о надежности элементов объекта, по данным о надежности объектов-аналогов, по данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчета.

Надежность – комплексное свойство, состоящее в общем случае из безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, например: для неремонтируемых объектов основным свойством может являться безотказность, для ремонтируемых объектов – ремонтпригодность.

Свойства изделий, характеризующие их надежность.

*Безотказность* – свойство непрерывно сохранять работоспособность в течение заданной наработки. Безотказность в той или иной степени свойственна объекту в любом из возможных режимов его существования. В основном безотказность рассматривается применительно к его использованию по назначению, но во многих случаях необходима оценка безотказности при хранении и транспортировании объекта.

*Долговечность* – свойство сохранять работоспособность до предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. Для невосстанавливаемых изделий понятия долговечности и безотказности совпадают. Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности и эффективности.

*Ремонтпригодность* – свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов. Термин «ремонтпригодность» традиционно трактуется в широком смысле. Этот термин эквивалентен международному термину «приспособленность к поддержанию работоспособного состояния» или, короче, «поддерживаемость» (maintainability). Помимо ремонтпригодности в узком смысле это понятие включает в себя «обслуживаемость», т.е. приспособленность объекта к техническому обслуживанию, «контролепригодность» и приспособленность к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, а также причин, их вызывающих. Более общее понятие «поддерживаемость», «эксплуатационная технологичность» (maintenance support, supportability) включает в себя ряд технико-экономических и организационных факторов, например качество подготовки обслуживающего персонала. Допускается дополнительно к термину «ремонтпригодность» в узком смысле применять термины «обслуживаемость», «контролепригодность», «приспособленность к диагностированию», «эксплуатационная технологичность» и др.

*Сохраняемость* – свойство изделия сохранять значение показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности во время хранения и

транспортирования. В процессе хранения и транспортирования объекты подвергаются неблагоприятным воздействиям, например колебаниям температуры, действию влажного воздуха, вибрациям и т.п. В результате после хранения и (или) транспортирования объект может оказаться в неработоспособном и даже в предельном состоянии. Сохраняемость объекта характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности его хранения и транспортирования. В зависимости от условий и режимов применения объекта требования сохраняемости ставят по-разному. Для некоторых классов объектов может быть поставлено требование, чтобы после хранения объект находился в таком же состоянии, что и к моменту начала хранения. В этом случае объект будет удовлетворять требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, предъявляемым к объекту к моменту начала хранения. В реальных условиях происходит ухудшение параметров, характеризующих работоспособность объекта, а также снижается его остаточный ресурс. В одних случаях достаточно потребовать, чтобы после хранения и (или) транспортирования объект оставался в работоспособном состоянии. В большинстве других случаев требуется, чтобы объект сохранял достаточный запас работоспособности, т.е. обладал достаточной безотказностью после хранения и (или) транспортирования. В тех случаях, когда предусмотрена специальная подготовка объекта к применению по назначению после хранения и (или) транспортирования, требование о сохранении работоспособности заменяется требованием, чтобы технические параметры объекта, определяющие его безотказность и долговечность, сохранялись в заданных пределах.

Требования к показателям безотказности, долговечности и ремонтпригодности для объекта, подвергнутого длительному хранению, должны указываться в техническом задании и в отдельных случаях могут быть снижены относительно уровня требований на новый объект, не находившийся на хранении.

Следует различать сохраняемость объекта до ввода в эксплуатацию и сохраняемость объекта в период эксплуатации (при перерывах в работе). Во втором случае срок сохраняемости входит составной частью в срок службы.

В зависимости от особенностей и назначения объектов срок сохраняемости до ввода объекта в эксплуатацию может включать в себя срок сохраняемости в упаковке и (или) законсервированном виде, срок монтажа и (или) срок хранения на другом, упакованном и (или) законсервированном более сложном объекте.

Надежность является одним из свойств, характеризующих качество изделий. Под *качеством* изделия понимается совокупность свойств изделия,

обусловливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением.

Для объектов, которые являются потенциальным источником опасности, важными понятиями являются «безопасность» и «живучесть». Безопасность – свойство объекта при изготовлении и эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды. Хотя безопасность не входит в общее понятие надежности, однако при определенных условиях тесно связана с этим понятием, например, если отказы могут привести к условиям, вредным для людей и окружающей среды сверх предельно допустимых норм.

Понятие «живучесть» занимает пограничное место между понятиями «надежность» и «безопасность». Под живучестью понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов. Примером служит сохранение несущей способности элементами конструкции при возникновении в них усталостных трещин, размеры которых не превышают заданных значений.

*Объекты*, рассматриваемые в теории надежности:

*изделие* – единица продукции, выпускаемая данным предприятием, цехом и т.д.;

*элемент* – условно неделимая составная часть системы;

*система* – совокупность совместно действующих элементов, предназначенных для самостоятельного выполнения заданных функций.

Изделия делятся на *невосстанавливаемые*, которые не могут быть восстановлены потребителем (эл. лампы и т.д.), и *восстанавливаемые*, которые могут быть восстановлены потребителем (автомобиль и т.д.).

Состояния объекта, характеризующие его надежность:

*исправное состояние* – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Исправное изделие обязательно работоспособно;

*работоспособное состояние* – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требо-



ваниям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Работоспособный объект может быть неисправным, например, если он не удовлетворяет эстетическим требованиям, причем ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его применению по назначению;

*неработоспособное состояние* – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего его способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Для некоторых объектов признаками неработоспособного состояния, кроме того, могут быть отклонения показателей качества изготавливаемой этими объектами продукции. Например для некоторых технологических систем к неработоспособному состоянию может быть отнесено такое, при котором значение хотя бы одного параметра качества изготавливаемой продукции не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) и технологической документации.

Переход объекта из одного состояния в другое обычно происходит вследствие повреждения или отказа. Переход объекта из исправного состояния в неисправное работоспособное состояние происходит из-за повреждений.

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

*Предельное состояние* – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно (понятие «эксплуатация» включает в себя, помимо применения по назначению, техническое обслуживание, ремонт, хранение и транспортирование). Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации объекта. При достижении предельного состояния объект должен быть снят с эксплуатации, направлен в средний или капитальный ремонт, списан, уничтожен или передан для применения не по назначению. Если критерий предельного состояния установлен из соображений безопасности хранения и (или) транспортирования объекта, то при наступлении предельного состояния хранение и (или) транспортирование объекта должно быть прекращено. В других случаях при наступлении предельного состояния должно быть прекращено применение объекта по назначению.

Для неремонтируемых объектов имеет место предельное состояние двух видов. Первый вид совпадает с неработоспособным состоянием. Второй вид предельного состояния обусловлен тем обстоятельством, что

начиная с некоторого момента времени дальнейшая эксплуатация еще работоспособного объекта оказывается недопустимой в связи с опасностью или вредностью эксплуатации. Переход неремонтируемого объекта в предельное состояние второго вида происходит до потери объектом работоспособности.

Для ремонтируемых объектов выделяют два или более вида предельных состояний. Например, для двух видов предельных состояний требуется отправка объекта в средний или капитальный ремонт, т.е. временное прекращение применения объекта по назначению. Третий вид предельного состояния предполагает окончательное прекращение применения объекта по назначению. Критерии предельного состояния каждого вида устанавливаются нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) и (или) эксплуатационной документацией

В международных стандартах введена более детальная классификация состояний. Так, в работоспособном состоянии различают «рабочее состояние» (operating state) и «нерабочее состояние» (nonoperating state), при котором объект не применяется по назначению. «Нерабочее состояние» подразделяют, в свою очередь, на состояние дежурства (standby state) и состояние планового простоя (idle, free state). Кроме того, различают «внутренне» неработоспособное состояние (internal disabled state), обусловленное отказом или незавершенностью планового технического обслуживания (ремонта), и «внешне» неработоспособное состояние (external disabled state), обусловленное организационными причинами. В отраслевой документации допускается использование более детальной классификации состояний.

### В р е м е н н ы е п о н я т и я

Продолжительность или объем работы объекта называются *наработкой*. Нарботка может быть как непрерывной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т.п.), так и целочисленной (число рабочих циклов, запусков и т.п.) величиной. Нарботку объекта, работающего непрерывно, можно измерять в единицах календарного времени. Если объект работает с перерывами, то различают непрерывную и суммарную наработку. В этом случае наработку также можно измерять в единицах времени. Для многих объектов физическое изнашивание связано не только с календарной продолжительностью эксплуатации, но и с объемом работы объекта, и поэтому зависит от интенсивности применения объекта по назначению. Для таких объектов наработку обычно выражают через объем произведенной работы или число рабочих циклов.

*Нарботка до отказа* – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

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

*Время восстановления* – продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта.

*Ресурс* – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

*Срок службы* – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

*Срок сохраняемости* – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. По истечении срока сохраняемости объект должен соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленным нормативно-технической документацией на объект.

*Остаточный ресурс* – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Аналогично вводятся понятия остаточной наработки до отказа, остаточного срока службы и остаточного срока хранения

*Назначенный ресурс* – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

*Назначенный срок службы* – календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

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

По истечении назначенного ресурса (срока службы, срока хранения) объект должен быть изъят из эксплуатации и должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей нормативно-технической документацией, – направление в ремонт, списание, уничтожение, проверка и установление нового назначенного срока и т.д.

Цель установления назначенного срока службы и назначенного ресурса – обеспечить принудительное заблаговременное прекращение применения объекта по назначению, исходя из требований безопасности или технико-экономических соображений. Для объектов, подлежащих длительному хранению, может быть установлен назначенный срок хранения, по истечении которого дальнейшее хранение недопустимо, например, из требований безопасности.

Назначенный срок службы и назначенный ресурс являются технико-эксплуатационными характеристиками и не относятся к показателям надежности (показателям долговечности). Однако при установлении назначенного срока службы и назначенного ресурса принимают во внимание прогнозируемые (или достигнутые) значения показателей надежности. Если установлено требование безопасности, то назначенный срок службы (ресурс) должен соответствовать значениям вероятности безотказной работы (ВБР) по отношению к критическим отказам, близким к единице. Из соображений безопасности может быть также введен коэффициент запаса по времени.

Термины «Наработка до отказа», «Наработка между отказами», «Время восстановления», «Ресурс», «Срок службы», «Срок сохраняемости», «Остаточный ресурс» относятся к конкретно взятому индивидуальному объекту. Имеется важное различие между величинами, определяемыми этими понятиями, и большинством величин, характеризующих механические, физические и другие свойства индивидуального объекта. Например, геометрические размеры, масса, температура, скорость и т.д. могут быть измерены непосредственно (в принципе – в любой момент времени существования объекта). Нарботка индивидуального объекта до первого отказа, его наработка между отказами, ресурс и т.п. могут быть определены лишь после того, как наступил отказ или было достигнуто предельное состояние. Пока эти события не наступили, можно говорить лишь о прогнозировании этих величин с большей или меньшей достоверностью.

Ситуация осложнена из-за того, что безотказная наработка, ресурс, срок службы и срок сохраняемости зависят от большого числа факторов, часть которых не может быть проконтролирована, а остальные заданы с той или иной степенью неопределенности. Безотказная работа конкретно взятого индивидуального объекта зависит от качества сырья, материалов, заготовок и полуфабрикатов, от достигнутого уровня технологии и степени стабильности технологического процесса, от уровня технологической дисциплины, от выполнения всех требований по хранению, транспортированию и применению объекта по назначению. Многие объекты включают в себя комплектующие изделия, детали и элементы, поставленные другими изготовителями. Перечисленные выше факторы, влияя на работоспособность составных частей объекта, определяют его работоспособность в целом.

Опыт эксплуатации объектов массового производства показывает, что как наработка до отказа, так и наработка между отказами обнаруживают значительный статистический разброс. Аналогичный разброс имеют также ресурс, срок службы и срок сохраняемости. Этот разброс может служить характеристикой технологической культуры и дисциплины, а также достигнутого уровня технологии. Разброс наработки до первого отказа,

ресурса и срока службы можно уменьшить, а их значения можно увеличить путем надлежащей и экспериментальной отработки каждого индивидуального объекта до передачи в эксплуатацию. Этот подход осуществляют для особо ответственных объектов. Целесообразность такого подхода для массовых объектов должна каждый раз подтверждаться технико-экономическим анализом.

Наработка до отказа вводится как для неремонтируемых (невосстанавливаемых), так и для ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов. Нарботка между отказами определяется объемом работы объекта от  $k$ -го до  $(k+1)$ -го отказа, где  $k = 1, 2 \dots$ . Эта наработка относится только к восстанавливаемым объектам.

Технический ресурс представляет собой запас возможной наработки объекта. Для неремонтируемых объектов он совпадает с продолжительностью пребывания в работоспособном состоянии в режиме применения по назначению, если переход в предельное состояние обусловлен только возникновением отказа.

Поскольку средний и капитальный ремонты позволяют частично или полностью восстанавливать ресурс, то отсчет наработки при исчислении ресурса возобновляют по окончании такого ремонта, различая в связи с этим доремонтный, межремонтный, послеремонтный и полный (до списания) ресурсы.

Доремонтный ресурс исчисляют до первого среднего (капитального) ремонта. Число возможных видов межремонтного ресурса зависит от чередования капитальных и средних ремонтов. Послеремонтный ресурс отсчитывают от последнего среднего (капитального) ремонта.

Полный ресурс отсчитывают от начала эксплуатации объекта до его перехода в предельное состояние, соответствующее окончательному прекращению эксплуатации.

Аналогичным образом выделяют виды срока службы и срока сохраняемости. При этом срок службы и срок сохраняемости измеряют в единицах времени. Соотношение значений ресурса и срока службы зависит от интенсивности использования объекта. Полный срок службы, как правило, включает продолжительности всех видов ремонта.

## Техническое обслуживание и ремонт

*Техническое обслуживание* – комплекс мероприятий или операция по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

*Восстановление* – процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния.

*Ремонт* – комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности изделий и восстановлению ресурсов изделий или их составных частей.

При разработке объекта предусматривают выполнение (или невыполнение) технического обслуживания объектов на протяжении срока их службы, т.е. объекты делят на технически обслуживаемые и технически необслуживаемые. При этом некоторые неремонтируемые объекты являются технически обслуживаемыми.

*Обслуживаемый объект* – объект, для которого проведение технического обслуживания предусмотрено нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией.

*Необслуживаемый объект* – объект, для которого проведение технического обслуживания не предусмотрено нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией.

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

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

*Ремонтируемый объект* – объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

*Неремонтируемый объект* – объект, ремонт которого не возможен или не предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

Деление объектов на ремонтируемые и неремонтируемые связано с возможностью восстановления работоспособного состояния путем ремонта, что предусматривается и обеспечивается при разработке и изготовлении объекта. Объект может быть ремонтируемым, но не восстанавливаемым в конкретной ситуации.

С о б ы т и я , х а р а к т е р и з у ю щ и е н а д е ж н о с т ь и з д е л и я

*Повреждение* – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

*Отказ* – событие, заключающееся в полной или частичной утрате работоспособности.

Отказ возникает в результате наличия в изделии одного или нескольких дефектов. Под *дефектом* понимается каждое отдельное несоот-

ветствие изделия установленным требованиям. Следует отметить, что появление дефектов не всегда приводит к отказу изделий.

*Вид отказа* – совокупность возможных или наблюдаемых отказов элемента и/или системы, объединенных в некоторую классификационную группу по общности одного или нескольких признаков (причины, механизм возникновения, внешние проявления и другие признаки, кроме последствий отказа).

*Тяжесть последствий отказа* – качественная или количественная оценка вероятного (наблюдаемого) ущерба от отказа элемента и/или системы.

Т а б л и ц а 1.1

Пример шкалы для установления категории тяжести последствий отказов

Категория тяжести последствий отказов	Характеристика тяжести последствий отказов
IV	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или окружающей среды, гибель или тяжелые травмы людей, срыв выполнения поставленной задачи
III	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или для окружающей среды, срыв выполняемой задачи, но создает пренебрежимо малую угрозу жизни и здоровью людей
II	Отказ, который может повлечь задержку выполнения задачи, снижение готовности и эффективности объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей
I	Отказ, который может повлечь снижение качества функционирования объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей

*Категория тяжести последствий отказов* – классификационная группа отказов по тяжести их последствий, характеризуемая определенным, установленным до проведения анализа сочетанием качественных и/или количественных учитываемых составляющих ожидаемого (вероятного) отказа или нанесенного отказом ущерба.

*Критический отказ* – отказ системы или ее элемента, тяжесть последствий которого в пределах данного анализа признана недопустимой и требует принятия специальных мер по снижению вероятности данного отказа и/или возможного ущерба, связанного с его возникновением.

*Критичный элемент* – элемент системы, отказ которого может быть критическим. Для конкретного изделия могут быть установлены иные признаки для отнесения элементов к категории критичных. Например, критич-

ным может быть элемент, отказ которого безусловно ведет к полному отказу системы, независимо от тяжести его последствий.

*Критичный технологический процесс* – технологический процесс (ТП), который применяется при изготовлении и/или монтаже системы или ее элементов и нарушение параметров которого или вносимые в ходе которого дефекты могут быть причиной критического отказа. Для конкретного изделия могут быть установлены иные признаки критичности ТП; например, критичным может быть признан техпроцесс, влияние которого на надежность системы или ее элементов неизвестно или недостаточно изучено.

*Показатель критичности отказа* – количественная характеристика критичности отказа, учитывающая его вероятность за время эксплуатации и тяжесть возможных последствий. В частности, в качестве показателя критичности отказа можно использовать риск отказа, равный произведению вероятности отказа на размер потерь при возникновении этого отказа.

*Критерием отказа* называют признаки неработоспособного состояния изделия, установленные в нормативно-технической или конструкторской документации. Если работоспособность объекта характеризуют совокупностью значений некоторых технических параметров, то признаком возникновения отказа является выход значений любого из этих параметров за пределы допусков. Кроме того, в критерии отказов могут входить также качественные признаки, указывающие на нарушение нормальной работы объекта.

Критерии отказов следует отличать от критериев повреждений. Под критериями повреждений понимают признаки или совокупность признаков неисправного, но работоспособного состояния объекта.

*Причина отказа* – явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа объекта.

*Последствия отказа* – явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта.

*Критичность отказа* – совокупность признаков, характеризующих последствия отказа. Классификация отказов по критичности (например по уровню прямых и косвенных потерь, связанных с наступлением отказа, или по трудоемкости восстановления после отказа) устанавливается нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией по согласованию с заказчиком исходя из технико-экономических соображений и соображений безопасности.

Понятие критичности отказа введено для того, чтобы проводить классификацию отказов по их последствиям. Подобная классификация содержится в международных документах ИСО, МЭК и ЕОКК, а также в некоторых отраслевых отечественных документах, например в нормативно-технической документации на объекты сельскохозяйственного машиностроения. Критерием для классификации могут служить прямые и кос-



венные потери, вызванные отказами, затраты труда и времени на устранение последствий отказов, возможность и целесообразность ремонта силами потребителя или необходимость ремонта изготовителем или третьей стороной, продолжительность простоев из-за возникновения отказов, степень снижения производительности при отказе, приводящем к частично неработоспособному состоянию и т.п. Классификация отказов по последствиям устанавливается по согласованию между заказчиком и разработчиком (изготовителем). Для простых объектов эта классификация не используется.

При классификации отказов по последствиям могут быть введены две, три и большее число категорий отказов. В международных документах ИСО, МЭК, ЕОКК различают критические (critical) и некритические (non-critical) отказы. Последние подразделяют на существенные (major) и несущественные (minor) отказы. Границы между категориями отказов достаточно условны.

Отказ одного и того же объекта может трактоваться как критический, существенный или несущественный, в зависимости от того, рассматривается объект как таковой или он является составной частью другого объекта. Несущественный отказ объекта, входящего в состав более ответственного объекта, может рассматриваться как существенный и даже критический, в зависимости от последствий отказа сложного объекта. Для проведения классификации отказов по последствиям необходим анализ критериев, причин и последствий отказов и построение логической и функциональной связи между отказами.

Т а б л и ц а 1.2

Пример ранжирования отказов по вероятности отказов  
и тяжести их последствий

Ожидаемая частота возникновения	Тяжесть последствий			
	Катастрофический отказ (категория IV)	Критический отказ (категория III)	Некритический отказ (категория II)	Отказ с пренебрежимо малыми последствиями (категория I)
Частый отказ	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>C</i>
Вероятный отказ	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Возможный отказ	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>D</i>
Редкий отказ	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Практически невероятный отказ	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Ранги отказов: <i>A</i> – обязателен углубленный количественный анализ критичности <i>B</i> – желателен количественный анализ критичности <i>C</i> – можно ограничиться качественным анализом <i>D</i> – анализ не требуется				

Т а б л и ц а 1.3

## Качественные оценки частоты отказов

Виды отказов по частоте	Качественное описание частоты для:	
	индивидуального изделия	совокупности изделий
Частый отказ	Вероятно частое возникновение	Наблюдается постоянно
Вероятный отказ	Будет наблюдаться несколько раз за срок службы изделия	Вероятно частое возникновение
Возможный отказ	Возможно одно наблюдение данного отказа за срок службы	Наблюдается несколько раз
Редкий отказ	Отказ маловероятен, но возможен хотя бы раз за срок службы	Вполне возможен хотя бы один раз
Практически невероятный отказ	Отказ настолько маловероятен, что вряд ли будет наблюдаться даже один раз за срок службы	Отказ маловероятен, но возможен хотя бы один раз

Критичность отказа  $C$  рассчитывают как произведение  $C=B_1 \cdot B_2 \cdot B_3$ , в котором сомножители оценивают в баллах с использованием ниже приведенных таблиц.

Т а б л и ц а 1.4

## Оценки вероятностей отказов в баллах

Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов, оцененная расчетом или экспериментальным путем	Оценка вероятности отказа в баллах (рекомендуемые значения) $B_1$
Отказ практически невероятен	Менее 0,00005	1
Отказ маловероятен	От 0,00005 до 0,001	2
Отказ имеет малую вероятность, обусловленную только точностью расчета	От 0,001 до 0,005	3
Умеренная вероятность отказа	От 0,005 до 0,01	4
Отказы возможны, но при испытаниях или в эксплуатации аналогичных изделий не наблюдались	От 0,001 до 0,005	5
Отказы возможны, наблюдались при испытаниях и в эксплуатации аналогичных изделий	От 0,001 до 0,005	6
Отказы вполне вероятны	От 0,005 до 0,01	7
Высокая вероятность отказов	От 0,01 до 0,10	8
Вероятны повторные отказы	Более 0,11	10

Т а б л и ц а 1.5

## Оценки последствий отказов

Описание последствий отказов	Оценка последствий в баллах (рекомендуемые значения) $B_2$
Отказ не приводит к заметным последствиям, потребитель вероятно не обнаружит наличие неисправности	1
Последствия отказа незначительны, но потребитель может выразить неудовольствие его появлением	2-3
Отказ приводит к заметному для потребителя снижению эксплуатационных характеристик и/или к неудобству применения изделия	4-6
Высокая степень недовольства потребителя, изделие не может быть использовано по назначению, но угрозы безопасности отказ не представляет	7-8
Отказ представляет угрозу безопасности людей или окружающей среды	9-10

Т а б л и ц а 1.6

## Оценка вероятности обнаружения отказа до поставки изделия потребителю

Виды отказов по вероятности обнаружения до поставки	Вероятность обнаружения отказа, оцененная расчетным или экспертным путем	Оценка вероятности в баллах (рекомендуемые значения) $B_3$
Очень высокая вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	Более 0,95	1
Высокая вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	От 0,95 до 0,85	2-3
Умеренная вероятность выявления отказа при контроле, сборке, испытаниях	От 0,85 до 0,45	4-6
Высокая вероятность поставки потребителю дефектного изделия	От 0,45 до 0,25	7-8
Очень высокая вероятность поставки потребителю дефектного изделия	Менее 0,25	9-10

Классификация отказов по последствиям необходима при нормировании надежности (в частности, для обоснованного выбора номенклатуры и численных значений нормируемых показателей надежности), а также при установлении гарантийных обязательств.

При выборе номенклатуры нормируемых показателей надежности необходимо учитывать назначение объекта, степень его ответственности, условия эксплуатации, характер отказов (внезапные, постепенные и т.п.), возможные последствия отказов, возможные типы предельных состояний. При этом целесообразно, чтобы общее число нормируемых показателей надежности было минимальным; нормируемые показатели

имели простой физический смысл, допускали возможность расчетной оценки на этапе проектирования, статистической оценки и подтверждения по результатам испытаний и (или) эксплуатации.

При обосновании численных значений нормируемых показателей надежности необходимо руководствоваться принципом оптимального распределения затрат на повышение надежности, техническое обслуживание и ремонт. Значения нормируемых показателей надежности учитываются, в частности, при назначении гарантийного срока эксплуатации, гарантийной наработки, гарантийного срока хранения, которые являются технико-экономическими (отчасти коммерческими) характеристиками объекта и не относятся к показателям надежности. Гарантийные сроки, показатели надежности и цена объекта должны быть взаимоувязаны.

Длительность гарантийного срока эксплуатации (гарантийной наработки, гарантийного срока хранения) должна быть достаточной для выявления и устранения скрытых дефектов и определяться соглашением между потребителем (заказчиком) и поставщиком (изготовителем).

#### В и д ы о т к а з о в

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

*Независимый отказ* – отказ, не обусловленный другими отказами.

*Зависимый отказ* – отказ, обусловленный другими отказами.

*Сбой* – самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора. Отличительным признаком сбоя является то, что восстановление работоспособного состояния объекта может быть обеспечено без ремонта, например, воздействием оператора на органы управления, устранением обрыва нити, магнитной ленты и т.п., коррекцией положения заготовки.

Характерным примером сбоя служит остановка ЭВМ, устраняемая повторным пуском программы с места останова или ее перезапуском сначала.

*Перемежающийся (самоустраняющийся) отказ* – многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера (нарушение электрического контакта).

В соответствии с характером развития и проявления отказы делят на следующие.

*Внезапные отказы* – отказы, характеризующиеся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта (например поломка от перегрузки).

*Постепенные отказы* – отказы, возникающие в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта (износ, старение).

Постепенные по развитию и внезапные по проявлению отказы – усталостные разрушения, перегорание ламп.

Термины «постепенные отказы» и «внезапные отказы» позволяют разделять отказы на две категории в зависимости от возможности прогнозировать момент наступления отказа. В отличие от внезапного отказа, наступлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого удастся предупредить наступление отказа или принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий.

Четкой границы между внезапными и постепенными отказами, однако, провести не удастся. Механические, физические и химические процессы, которые составляют причины отказов, как правило, протекают во времени достаточно медленно. Так, усталостная трещина в стенке трубопровода или сосуда давления, зародившаяся из трещинообразного дефекта, медленно растет в процессе эксплуатации; этот рост в принципе может быть прослежен средствами неразрушающего контроля. Однако собственно отказ (наступление течи) происходит внезапно. Если по каким-либо причинам своевременное обнаружение несквозной трещины оказалось невозможным, то отказ придется признать внезапным.

По мере совершенствования расчетных методов и средств контрольно-измерительной техники, позволяющих своевременно обнаруживать источники возможных отказов и прогнозировать их развитие во времени, все большее число отказов будет относиться к категории постепенных.

Существует и такое определение внезапного отказа: это отказ, наступление которого не может быть предсказано предварительным контролем или диагностированием.

По возможности дальнейшего использования изделия отказы делят на *полные*, исключающие возможность работы изделия до их устранения, и *частичные*, при которых изделие может частично использоваться, например, с неполной мощностью или на пониженной скорости.

По времени возникновения отказы делятся на *приработочные*, возникающие в первый период эксплуатации, на *отказы при нормальной эксплуатации* (в период до проявления износных отказов) и на *износные*.

По возможности обнаружения отказы бывают следующими.

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

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

По причинам возникновения отказы делятся на *конструктивные*, возникшие по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования; *производственные*, возникшие по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии; *эксплуатационные*, возникшие по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации; *деградационные*, обусловленные естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

При анализе надежности различают ранние отказы, когда проявляется влияние дефектов, не обнаруженных в процессе изготовления, испытаний и (или) приемочного контроля, и поздние, деградационные отказы. Последние происходят на заключительной стадии эксплуатации объекта, когда вследствие естественных процессов старения, изнашивания и т.п. объект или его составные части приближаются к предельному состоянию по условиям физического износа. Вероятность возникновения деградационных отказов в пределах планируемого полного или межремонтного срока службы (ресурса) должна быть достаточно мала. Это обеспечивается расчетом на долговечность с учетом физической природы деградационных отказов, а также надлежащей системой технического обслуживания и ремонта.

В принципе можно практически исключить возникновение ранних отказов, если до передачи объекта в эксплуатацию провести приработку, обкатку, технологический прогон и т.п. При этом соответственно может варьироваться цена объекта.

Причины отказов делятся на *случайные* и *систематические*.

*Случайные причины отказов* – причины, возникновение которых нельзя предугадать заранее. Случайной причиной отказов обычно является неблагоприятное сочетание случайных факторов.

*Систематические причины* – причины, возникновение которых можно предугадать заранее (влияние температуры, трения, агрессивных химических веществ и т.д.).

## 1.2. Случайные величины, их свойства и характеристики

В расчетах надежности многие параметры рассматриваются как случайные величины. Например, рассеяние ресурсов по критерию усталости (оцениваемое отношением наибольшего ресурса к наименьшему) для подшипников достигает 40, для зубчатых передач – 10...15. Это вызвано тем, что факторы, влияющие на рассчитываемые параметры, носят случайный характер.

Относительная частота и вероятность появления события

Относительная частота (частость) появления события  $A$  равна:

$$P^*(A) = m/N,$$

где  $m$  – число появлений события  $A$  при проведении  $N$  испытаний.

С увеличением числа испытаний относительная частота появления события  $A$  стремится к определенной величине. Эта величина называется вероятностью случайного события  $A$  и обозначается  $P(A)$ .

При большом числе испытаний

$$P(A) \approx P^*(A).$$

### Теорема сложения вероятностей

В теории вероятности *суммой  $A+B$  событий  $A$  и  $B$*  называют событие, заключающееся в том, что произошло по крайней мере одно из событий:  $A$  или  $B$ .

События могут быть *совместными* и *несовместными*. *Совместные события* могут произойти одновременно. *Несовместные* – не могут.

**Теорема сложения вероятностей:** вероятность суммы  $n$  событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$  равна:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{i<j} P(A_i A_j) + \sum_{i<j<k} P(A_i A_j A_k) - \dots \\ \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 A_2 \dots A_n),$$

где  $A_i A_j$  – произведение событий  $A_i$  и  $A_j$ .

*Произведением событий  $A_i$  и  $A_j$*  называют событие, заключающееся в том, что произошли оба события:  $A_i$  и  $A_j$ .

Вероятность суммы  $n$  несовместных событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$  равна:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i).$$

### Теорема умножения вероятностей

События могут быть независимыми и зависимыми.

*Событие  $A$*  называют *независимым* от события  $B$ , если вероятность события  $A$  не зависит от того, произошло ли событие  $B$ . *Событие  $A$*  называют *зависимым* от события  $B$ , если вероятность события  $A$  зависит от того, произошло ли событие  $B$ .

Вероятность события  $A$ , вычисленная при условии, что имело место другое событие  $B$ , называется *условной вероятностью события  $A$*  и обозначается  $P(A/B)$ .

**Теорема умножения вероятностей:** вероятность произведения  $n$  событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$  равна:

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = P(A_1)P(A_2/A_1)P(A_3/A_1 A_2) \dots P(A_n/A_1 A_2 \dots A_{n-1}).$$

Вероятность произведения  $n$  независимых событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$  событий равна произведению вероятностей этих событий.

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = P(A_1)P(A_2) \dots P(A_n).$$

### Характеристики случайных величин

Для каждого значения  $x$  случайной величины  $X$  существует вероятность  $P(X < x)$  того, что  $X$  меньше  $x$ . Зависимость  $F(x) = P(X < x)$  называется *функцией распределения* или *функцией вероятности случайной величины*  $X$ . Функция  $F(x)$  в пределах изменения случайной величины изменяется от 0 до 1.

Если случайной величиной  $X$  является наработка до отказа (наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа), то функция распределения этой величины равна вероятности возникновения отказа  $Q(x)$  в течение наработки  $x$ :

$$F(x) = P(X < x) = Q(x).$$

Вероятность отказа – это вероятность того, что в пределах заданной наработки возникнет отказ изделия. Вероятность отказа является дополнением до единицы вероятности безотказной работы.

Вероятность безотказной работы (ВБР)  $P(x)$ , т.е. вероятность  $P(X \geq x)$  того, что наработка  $X$  до отказа больше или равна значению  $x$ , составляет:

$$P(x) = P(X \geq x) = 1 - Q(x) = 1 - F(x).$$

Производная от функции распределения  $F(x)$  по переменной  $x$  называется *плотностью распределения*  $f(x)$  случайной величины  $X$ :

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

В теории надежности величину  $f(x)$  называют *плотностью вероятности*. Площадь под кривой  $f(x)$  на заданном интервале значений случайной величины равна вероятности попадания случайной величины в этот интервал.

Значения характеристик, полученные по результатам испытаний или эксплуатации, называют статистическими оценками.

Основной характеристикой случайной величины  $X$  является *математическое ожидание*  $M_x$  величины  $X$ . С увеличением числа опытов среднее значение  $\bar{X}$  случайной величины стремится к ее математическому ожида-



нию. Для дискретной случайной величины ее среднее значение определяется по формуле

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad \text{или} \quad \bar{X} = \sum_{j=1}^Z \frac{g_j x_j}{N},$$

где  $x_i$  – значение величины  $X$  при  $i$ -м наблюдении;

$N$  – общее число наблюдений;

$g_j$  – число одинаковых значений  $x_j$ ;

$Z$  – число отличающихся друг от друга значений  $x_j$  случайной величины  $X$ .

Математическое ожидание для непрерывных величин (вероятностная трактовка) определяется по формуле

$$M_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx,$$

а для дискретных величин (статистическая трактовка) – по формуле

$$M_x = \sum p_j x_j,$$

где  $p_j$  – вероятность появления значения  $x_j$ .

*Дисперсия (рассеяние)  $D_x$  случайной величины* – это величина, характеризующая отклонение случайной величины  $x$  от ее математического ожидания  $M_x$ . Она равна математическому ожиданию квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания. В вероятностной трактовке:

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_x)^2 f(x) dx.$$

В статистической трактовке:

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - M_x)^2 = \sum_{j=1}^Z (x_j - M_x)^2 p_j,$$

где  $x_i$  – значение величины  $X$  при  $i$ -м наблюдении;

$N$  – общее число наблюдений;

$p_j$  – вероятность появления значения  $x_j$ ;

$Z$  – число отличающихся друг от друга значений  $x_j$  случайной величины  $X$ .

Оценка дисперсии случайной величины – среднее значение квадрата отклонения этой величины от ее среднего значения:

$$D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2.$$

Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины. Другая характеристика рассеяния случайной величины – *среднее квадратическое отклонение*  $\sigma_x$  – имеет ту же размерность, что и случайная величина:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}.$$

Для оценки рассеяния с помощью безразмерной величины используют коэффициент вариации:

$$v_x = \frac{\sigma_x}{M_x}.$$

*Квантилью* называют значение  $x$  случайной величины  $X$ , соответствующее заданной вероятности  $P(X < x)$ .

Квантиль, соответствующая вероятности 0,5, называется *медианой*. Площадь под графиком функции плотности распределения делится медианой пополам.

*Модой* случайной величины  $X$  называют наиболее вероятное значение этой величины.

### 1.3. Вероятностные законы распределения, используемые в расчетах надежности

Вероятностный закон распределения случайной величины может быть представлен в виде *функции распределения*  $F(t)$  *случайной величины*  $T$ :

$$F(t) = P(T < t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt$$

и функции плотности распределения случайной величины  $T$ :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}.$$

Плотность распределения удовлетворяет условиям:

$$f(t) \geq 0; \int_{-\infty}^{\infty} f(t)dt = 1.$$



Рис. 1.1. Кривая плотности распределения

Заштрихованная площадь под кривой плотности распределения (см. рис. 1.1) на участке  $[0; t_1]$  представляет собой вероятность попадания случайной величины  $T$  на этот участок. Если на оси абсцисс отложить наработку, а на оси ординат – плотность распределения наработки до отказа, то площадь под кривой слева от точки  $t_1$  определяет вероятность отказа в интервале времени  $[0; t_1]$ , а площадь под кривой справа от точки  $t_1$  – вероятность безотказной работы в этом же интервале.

Для описания надежности используют различные законы распределения случайных величин.

### Биномиальный закон распределения случайной величины

Биномиальному распределению подчиняется дискретная случайная величина, представляющая собой число каких-либо событий. В теории надежности часто рассматриваются такие события, как отказы и безотказная работа. При биномиальном распределении вероятность того, что ровно  $m$  элементов системы из общего числа  $n$  элементов окажутся работоспособными, равна:

$$P_m = C_n^m p^m (1-p)^{n-m},$$

где  $p$  – вероятность безотказной работы элемента системы;

$C_n^m$  – биномиальный коэффициент, называемый “числом сочетаний (комбинаций) по  $m$  из  $n$ ”:

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

Биномиальный закон распределения используется для расчета вероятности безотказной работы системы типа « $m$  из  $n$ », т.е. системы, работоспособность которой сохраняется, если из  $n$  ее элементов работоспособными окажутся любые  $m$  и более элементов.

Поскольку для отказа системы « $m$  из  $n$ » достаточно, чтобы количество исправных элементов было меньше  $m$ , вероятность отказа системы может быть найдена по теореме сложения вероятностей:

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (1.1)$$

Аналогичным образом можно определить вероятность безотказной работы как сумму:

$$P = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (1.2)$$

При расчетах из формул (1.1) и (1.2) следует выбрать ту, которая содержит меньшее число слагаемых, а затем при необходимости воспользоваться выражением

$$Q+P=1.$$

### Нормальный закон распределения случайной величины

*Нормальное распределение* случайной величины является следствием воздействия на эту величину большого числа равнозначных факторов. В теории надежности оно используется для расчета показателей надежности изделий в период постепенных отказов из-за износа и старения.

Плотность распределения величины  $T$  при ее нормальном распределении (рис. 1.2) выражается соотношением

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

где  $\sigma$ ,  $M_t$  – среднее квадратическое отклонение и математическое ожидание величины  $T$  соответственно. Случайной величиной  $T$ , рассматриваемой в теории надежности, обычно является наработка до отказа или несущая способность.

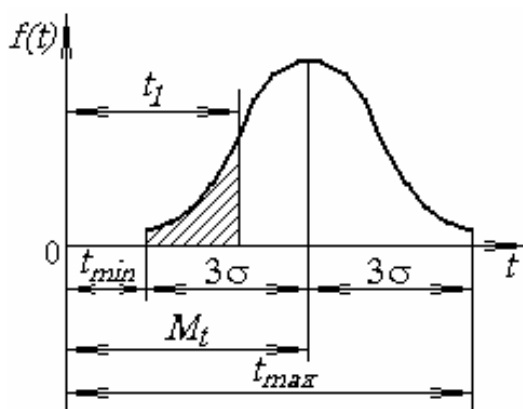


Рис. 1.2. Плотность нормального распределения

Функция распределения величины  $T$  при ее нормальном распределении имеет вид:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t - M_t)^2}{2\sigma^2}\right] dt.$$

Вычисление  $f(t)$ ,  $F(t)$  осуществляют с помощью таблиц, в которых приводятся значения соответственно  $f_0(x)$  и  $F_0(x)$  для нормированного нормального распределения. Нормированное нормальное распределение – это нормальное распределение, при котором  $\sigma=1$ ;  $M=0$ . Поэтому формулы

для плотности распределения и функции распределения имеют в этом случае следующий вид:

$$f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right],$$

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx.$$

Если в этих формулах сделать подстановку  $x=(t-M_t)/\sigma$ , то тогда  $F_0(x)=F(t)$ , а  $f_0(x)/\sigma=f(t)$ . Поэтому для определения  $f(t)$ ,  $F(t)$  по таблицам сначала необходимо определить значение  $x$  (это значение называется *квантилью нормированного нормального распределения*) по формуле  $x=(t-M_t)/\sigma$ , затем по соответствующим таблицам найти  $f_0(x)$  и  $F_0(x)$ . Значения  $F(t)$ ,  $f(t)$  вычисляются по формулам  $F(t)=F_0(x)$  и  $f(t) = f_0(x)/\sigma$ . Значения  $F_0(x)$  и  $f_0(x)$  в таблицах приведены для  $x \geq 0$ . Для  $x < 0$   $F_0(x)$  и  $f_0(x)$  определяют по формулам  $F_0(-x)=1-F_0(x)$ ;  $f_0(-x)=f_0(x)$ .

*Распределение суммы независимых случайных величин  $U=X+Y+Z$ , называемое композицией распределений*, при нормальном распределении слагаемых также является нормальным распределением.

Математическое ожидание и дисперсия для композиции соответственно равны:

$$M_u = M_x + M_y + M_z; \quad D_u = D_x + D_y + D_z,$$

где  $M_x, M_y, M_z$  – математические ожидания случайных величин  $X, Y, Z$ ;  
 $D_x, D_y, D_z$  – дисперсии тех же величин.

### Логарифмически нормальный закон распределения случайной величины

*Логарифмически нормальное распределение* (рис. 1.3) – это распределение случайной величины, логарифм которой распределен по нормальному закону. В теории надежности такое распределение используют для расчета показателей надежности изделий в период наступления усталости материала и в период между отказами.

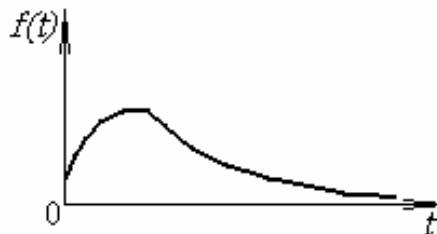


Рис. 1.3. Плотность логарифмически нормального распределения

Плотность распределения в этом случае описывается соотношением

$$f(t) = \frac{1}{st\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2s^2}\right].$$

Параметры  $\mu$  и  $s$  определяют по результатам испытаний.

Плотность распределения, функцию распределения можно найти по таблицам для нормированного нормального распределения, вычисляя квантиль по формуле  $x=(\ln t - \mu)/s$ .

Математическое ожидание

$$M(t) = e^{\mu + \frac{s^2}{2}}.$$

### Экспоненциальный закон распределения случайной величины

*Экспоненциальный закон распределения*, называемый также *основным законом надежности*, используется для описания надежности изделия в период его нормальной эксплуатации, когда постепенные отказы еще не проявились и в изделии возникают только внезапные отказы. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и потому имеют постоянную интенсивность  $\lambda$ . Экспоненциальный закон в теории надежности нашел широкое применение, так как он прост для практического использования.

Плотность распределения (рис. 1.4) в этом случае описывается соотношением

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

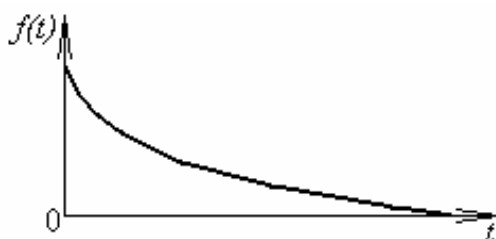


Рис. 1.4. Плотность экспоненциального распределения

Функция распределения

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Функция распределения равна вероятности отказа  $Q(t)$  изделия в интервале времени (наработки)  $[0, t)$ .

Вероятность безотказной работы

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

Математическое ожидание  $M$  и среднее квадратическое отклонение:

$$M_t = \sigma_t = \frac{1}{\lambda}.$$

### Распределение случайной величины по закону Вейбулла

*Распределение Вейбулла* представляет собой *двухпараметрическое распределение*. Закон Вейбулла удовлетворительно описывает распределение наработки до отказа подшипников, элементов радиоэлектронной аппаратуры, его используют для оценки надежности деталей и узлов машин, в частности автомобилей, а также для оценки надежности машин в процессе их приработки.

Широкое применение закона Вейбулла объясняется тем, что этот закон является универсальным, т.к. он может описывать процессы с распределениями: нормальным, логарифмически нормальным, экспоненциальным и др.

Плотность распределения по закону Вейбулла (рис. 1.5) выражается зависимостью вида:

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} \exp\left[-\frac{t^m}{t_0}\right],$$

где  $m$  – параметр формы кривой распределения;

$t_0$  – параметр масштаба.

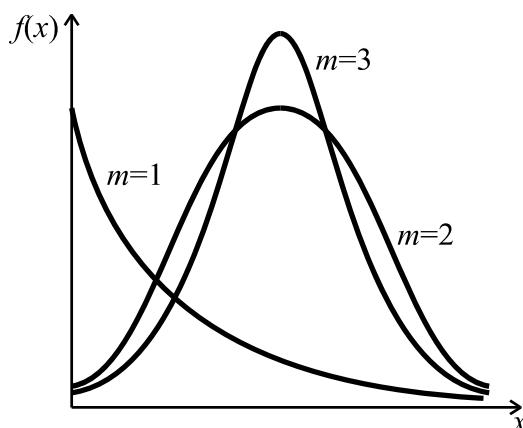


Рис. 1.5. Плотность распределения по закону Вейбулла

Функция распределения (вероятность отказа) описывается соотношением

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\frac{t^m}{t_0}\right].$$

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = \exp\left[-\frac{t^m}{t_0}\right].$$

Подбирая значения параметров  $m$  и  $t_0$ , можно получить лучшее соответствие расчетных значений опытным данным по сравнению с нормальным и экспоненциальным законами.

Для изделий, у которых имеются скрытые дефекты, но которые длительное время не стареют, опасность отказа имеет наибольшее значение в начальный период, а потом быстро падает. Вероятность безотказной работы для такого изделия хорошо описывается законом Вейбулла с параметром  $m < 1$ . И наоборот, если изделие хорошо контролируется при изготовлении и почти не имеет скрытых дефектов, но подвергается быстрому старению, то функция надежности описывается законом Вейбулла с параметром  $m > 1$ . При  $m = 3,3$  распределение Вейбулла близко к нормальному. При  $m = 1$  распределение Вейбулла становится экспоненциальным.

#### Оценка правильности выбора закона распределения случайной величины

Для определения правильности выбора закона распределения случайной величины применяются *критерии согласия*. Обычно в практике используются критерии согласия Колмогорова или Пирсона (критерий  $\chi^2$  – хи-квадрат).

Для проверки по критерию  $\chi^2$  необходимо определить вероятность согласия  $P(\chi^2)$ . Эта величина зависит от критерия  $\chi^2$  и числа степеней свободы.

*Критерий  $\chi^2$*  вычисляется по формуле

$$\chi^2 = N \sum_{i=1}^k \frac{(P^*(x_i) - P(x_i))^2}{P(x_i)},$$

где  $P^*(x_i)$  – относительная частота (частость) попадания случайной величины в  $i$ -й интервал, полученная из опыта;

$P(x_i)$  – вероятность попадания случайной величины в  $i$ -й интервал, подсчитанная по формуле теоретического распределения;

$N$  – число испытанных изделий;

$k$  – число интервалов.

Следует иметь в виду, что число наблюдений в каждом интервале должно быть не меньше 5. Теоретические вероятности  $P(x_i)$  могут быть подсчитаны путем умножения плотности распределения случайной величины  $f(x_i)$  на длину интервала.



Алгоритм оценки правильности выбора закона распределения с использованием критерия  $\chi^2$ :

- определяются теоретические и эмпирические частоты. Если среди опытных частот имеются малочисленные, их необходимо объединить с соседними так, чтобы число попаданий в объединенный интервал было не менее 5;

- вычисляется критерий  $\chi^2$ ;

- определяется число степеней свободы  $r$ :

$$r = k - s - 1,$$

где  $k$  – число интервалов;  $s$  – число параметров распределения;

- по таблице по полученным значениям  $\chi^2$  и  $r$  находится *вероятность согласия*  $P(\chi^2)$ ;

- формулируется вывод о правильности выбора закона распределения случайной величины. Если  $P(\chi^2)$  окажется больше 0,01, то следует считать опытное распределение согласующимся с теоретическим. В противном случае избранный закон распределения отвергается.

#### Нахождение оценок параметра распределения методом максимального правдоподобия для распределений с одним неизвестным параметром

Предположим, что случайная величина  $X$  является однопараметрическим непрерывным распределением с плотностью вероятности  $f(x, \Theta)$ , где  $\Theta$  – неизвестный параметр распределения. Рассмотрим случайную выборку из совокупности величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , по которой требуется определить наилучшую оценку параметра распределения. С этой целью введем функцию

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n; \Theta) = f(x_1; \Theta) f(x_2; \Theta) \dots f(x_n; \Theta),$$

которую называют функцией правдоподобия выборки.

*Метод максимального правдоподобия* состоит в нахождении такого параметра, при котором функция становится максимальной. Так как  $G = \log_a L$  является возрастающей функцией  $L$ , то значение параметра  $\Theta$ , обращающее в максимум  $\log_a L$ , также максимизирует  $L$ . Чтобы найти оценку параметра распределения, производную от функции правдоподобия по параметру  $\Theta$  необходимо приравнять к нулю:

$$\frac{d \log_a L}{d \Theta} = 0.$$

Аналогична форма записи функции правдоподобия при использовании метода максимального правдоподобия для дискретного распределения:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n; \Theta) = P(x_1; \Theta) P(x_2; \Theta) \dots P(x_n; \Theta),$$

где  $P(x,)$  – функция, зависящая от параметра  $\Theta$ .

**Пример.** Пусть проводятся испытания пяти элементов ( $n=5$ ) до тех пор, пока не откажут все элементы; времена  $t_1$ –  $t_5$  наработок до отказа равны соответственно: 5; 10; 15; 20 и 25 ч. Нарботка до отказа имеет распределение по экспоненциальному закону с плотностью вероятности  $f(t, \lambda) = \lambda e^{-\lambda t}$ , где  $\lambda$  – параметр распределения.

Найти оценку параметра  $\lambda$  методом максимального правдоподобия.

**Решение.** Составим функцию правдоподобия и прологарифмируем ее:

$$L = \lambda^n \exp(-\lambda \sum_{i=1}^n t_i),$$

$$G = \ln L = n \ln \lambda - \lambda \sum_{i=1}^n t_i.$$

Затем частную производную функции  $G$  приравняем к нулю:

$$\frac{dG}{d\lambda} = \frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^n t_i = 0.$$

Решив это уравнение относительно параметра  $\lambda$ , получим его оценку:

$$\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i}.$$

Из этой формулы следует, что

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{cp}}},$$

где  $T_{\text{cp}}$  – среднее значение наработки до отказа.

Таким образом,

$$\lambda = \frac{5}{5 + 10 + 15 + 20 + 25} = 0,067 \text{ ч}^{-1}.$$

## 1.4. Показатели надежности

### Классификация показателей

Показатель надежности – это количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта. Его используют для количественной характеристики надежности.

К показателям надежности относят количественные характеристики надежности, которые вводят согласно правилам статистической теории надежности. Область применения этой теории ограничена крупносерийными объектами, которые изготавливают и эксплуатируют в статистически однородных условиях и к совокупности которых применимо

статистическое истолкование вероятности. Примером служат массовые изделия машиностроения, электротехнической и радиоэлектронной промышленности.

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

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

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

На стадии проектирования и конструирования показатели надежности трактуют как характеристики вероятностных или полувероятностных математических моделей создаваемых объектов. На стадиях экспериментальной отработки, испытаний и эксплуатации роль показателей надежности выполняют статистические оценки соответствующих вероятностных характеристик.

В целях единообразия все показатели надежности, перечисленные в настоящем учебном пособии, определены как вероятностные характеристики. Это подчеркивает также возможность прогнозирования значения этих показателей на стадии проектирования.

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

Показатели надежности классифицируют:

- по способу их получения;
- по области их использования;
- по области их распространения;
- по свойствам изделий, характеризующим надежность.

По способу получения показатели надежности делятся на:

- *эксплуатационные*, получаемые по результатам эксплуатационных испытаний. Одним из основных видов эксплуатационных испытаний является опытная эксплуатация. Кроме того, может проводиться подконтрольная эксплуатация, которая в некоторой степени условно может быть отнесена также к эксплуатационным испытаниям. Подконтрольная эксплуатация представляет собой естественную эксплуатацию, ход и результаты которой наблюдаются персоналом, специально предназначенным и подготовленным для этой цели (дополнительным или штатным) и руководствующимся документацией, разработанной также специально для сбора, учета и первичной обработки информации, источником которой служит подконтрольная эксплуатация;

- *экспериментальные*, получаемые по данным испытаний;
- *расчетные*, получаемые расчетными методами; экстраполированные, получаемые на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполяции на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

По области использования показатели надежности делятся на:

- *нормативные*, используемые в нормативно-технической или конструкторской (проектной) документации;
- *оценочные*, применяемые для оценки надежности по результатам испытаний и эксплуатации.

По области распространения показатели надежности делятся на *индивидуальные* и *групповые*, используемые для оценки надежности одного изделия и партии изделий соответственно.

По свойствам изделий, характеризующим их надежность, различают показатели надежности, приведенные в табл. 1.7: показатели безотказности, показатели долговечности, показатели сохраняемости, показатели ремонтпригодности и показатели, применяемые для оценки комбинации свойств (комплексные показатели).

Таблица 1.7

Классификация показателей надежности по свойствам изделий,  
характеризующим надежность

Свойства, характеризующие надежность	Наименование показателя	Обозначение	
Безотказность	Вероятность безотказной работы	$P(t)$	Единичные показатели
	Гамма-процентная наработка до отказа	$T_\gamma$	
	Средняя наработка до отказа	$T_{ср}$	
	Средняя наработка на отказ	$T_0$	
	Интенсивность отказов	$\lambda(t)$	
	Параметр потока отказов	$\omega(t)$	
	Осредненный параметр потока отказов	$\bar{\omega}(t)$	
Долговечность	Гамма-процентный ресурс	$T_{р\gamma}$	
	Средний ресурс	$T_p$	
	Гамма-процентный срок службы	$T_{сл\gamma}$	
	Средний срок службы	$T_{сл}$	
Сохраняемость	Средний срок сохраняемости	$T_c$	
	Гамма-процентный срок сохраняемости	$T_{с\gamma}$	
	Назначенный срок хранения	$T_{с.н}$	
	Установленный срок сохраняемости	$T_{с.у}$	
Ремонтопригодность	Среднее время восстановления	$T_v$	
	Вероятность восстановления	$P_v(t_v)$	
Комбинация свойств	Коэффициент готовности	$K_g$	Комплексные показатели
	Коэффициент оперативной готовности	$K_{о.г}$	
	Коэффициент технического использования	$K_{т.и}$	

С помощью *единичных показателей* оценивают одно из свойств, составляющих надежность объекта, с помощью *комплексных показателей* – одновременно несколько таких свойств.

### Показатели безотказности

*Вероятность безотказной работы*  $P(t)$  – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделий не возникает. Другими словами, вероятность безотказной работы  $P(t)$  – это вероятность того, что наработка  $T$  изделия до отказа больше или равна заданной наработке  $t$ , т.е. вероятность  $P(T \geq t)$ .

Статистическую оценку вероятности безотказной работы в течение наработки  $t$  определяют из соотношения

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

где  $N_p(t)$  – число работоспособных изделий к концу времени  $t$  испытаний или эксплуатации;

$N$  – число изделий, поставленных на испытания или эксплуатацию;

$n(t)$  – число изделий, отказавших в течение наработки  $t$ .

Вероятность отказа

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

Вероятность отказа равна функции распределения наработки до отказа  $F(t)$ :

$$Q(t) = P(T < t) = F(t).$$

Распределение отказов во времени характеризуется *плотностью распределения* наработки до отказа  $f(t)$ :

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

где  $\Delta n(t)$  – число отказавших изделий в течение наработки  $\Delta t$ .

Так как  $P(t) = 1 - Q(t)$ , то

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.3)$$

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

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

где  $\Delta n(t)$  – число отказов в интервале наработки  $[t; t+\Delta t)$ .

Так как  $\frac{N_p(t)}{N} = P(t)$ , то

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (1.4)$$

Из формул (1.3) и (1.4) выводится одно из основных уравнений теории надежности:

$$\begin{aligned} \lambda(x) = -\frac{dP(x)}{P(x)dx} &\Rightarrow \frac{dP(x)}{P(x)} = -\lambda(x)dx \Rightarrow \ln P(t) = -\int_0^t \lambda(x)dx \Rightarrow \\ &\Rightarrow P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(x)dx\right]. \end{aligned}$$

Параметр потока отказов представляет собой отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M \{m(t + \Delta t) - m(t)\}}{\Delta t},$$

где  $\Delta t$  – малый отрезок наработки;  $m(t)$  – число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки  $t$ ;

$m(t + \Delta t) - m(t)$  – представляет собой число отказов на отрезке  $\Delta t$ .

Осредненный параметр потока отказов  $\bar{\omega}(t)$  определяют по формуле

$$\bar{\omega}(t) = \frac{M \{m(t_2) - m(t_1)\}}{t_2 - t_1},$$

при  $t_1 \leq t \leq t_2$ .

Статистическую оценку для параметра потока отказов находят по формуле

$$\hat{\omega} = \frac{m(t_2) - m(t_1)}{t_2 - t_1}.$$

Средняя наработка до отказа  $T_{\text{ср}}$  – это математическое ожидание наработки изделия до первого отказа.

В вероятностной трактовке:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

В статистической трактовке:

$$T_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^k P(t_i) \Delta t_i,$$

где  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ ;

$k$  – общее число рассматриваемых интервалов наработки;

$$P(t_i) = \frac{N_p(t_i)}{N};$$

здесь  $N_p(t_i)$  – число работоспособных изделий к моменту наработки  $t_i$ ;

$N$  – общее число изделий, поставленных на испытание или в эксплуатацию.

Средняя наработка на отказ – это отношение суммарной наработки восстанавливаемого изделия к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Другими словами, средняя наработка на

отказ – это математическое ожидание наработки изделия до очередного отказа после начала эксплуатации или ремонта.

### Показатели долговечности

*Технический ресурс* (сокращенно – *ресурс*) – наработка изделия от начала его эксплуатации после изготовления или ремонта до предельного состояния. Ресурс выражается в единицах времени работы, длины пути и в единицах выпуска продукции. Различают ресурс от ввода в эксплуатацию до первого капитального ремонта; между капитальными ремонтами; до списания (полный ресурс).

Средний ресурс

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N},$$

где  $T_{pi}$  – ресурс  $i$ -го изделия;

$N$  – число изделий, поставленных на испытания.

*Гамма-процентный ресурс*  $T_{\gamma}$  – ресурс, обеспечиваемый с вероятностью  $\gamma$ . Ресурс  $T_{p50}$  называют медианным. При исчерпании этого ресурса половина изделий достигает предельного состояния.

Средний, гамма-процентный сроки службы определяются так же, как и соответствующие значения ресурса.

При использовании показателей долговечности следует указывать начало отсчета и вид действий после наступления предельного состояния (например, гамма-процентный ресурс от второго капитального ремонта до списания). Показатели долговечности, отсчитываемые от ввода объекта в эксплуатацию до окончательного снятия с эксплуатации, называются гамма-процентный полный ресурс (срок службы), средний полный ресурс (срок службы).

В технической документации обычно указываются такие показатели, как *гарантийная наработка* и *срок гарантии*.

*Гарантийная наработка* – это наработка изделия, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает определенное качество изделия при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования. Если в течение этой наработки возникнут неисправности по вине завода-изготовителя, то последний должен безвозмездно их устранить.

*Срок гарантии* – это календарная гарантийная наработка.

### Показатели сохраняемости

*Гамма-процентный срок сохраняемости* – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.



*Средний срок сохраняемости* – математическое ожидание срока сохраняемости.

### Показатели ремонтпригодности

*Время восстановления* – календарная продолжительность восстановления работоспособного состояния изделия или календарная продолжительность его технического обслуживания. В расчет не берется время на организационные мероприятия (подготовка инструмента, материала и т.д.).

Если на отыскание причин  $m$  отказов и их устранение затрачено время  $T_{в1}, T_{в2}, \dots, T_{вm}$ , то среднее время восстановления:

$$T_{в} = \frac{\sum_{i=1}^m T_{ви}}{m}.$$

*Вероятность восстановления*  $P_{в}(t_{в})$  – вероятность восстановления изделия в течение времени, не превышающего  $t_{в}$ .

Для комплексной оценки ремонтпригодности допускается дополнительно использовать показатели типа удельной трудоемкости ремонта и удельной трудоемкости технического обслуживания.

### Комплексные показатели

Комплексные показатели характеризуют и безотказность, и ремонтпригодность.

*Коэффициент готовности*  $K_{г}$  – вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени кроме планируемых перерывов в его работе (плановое техническое обслуживание, перерывы между рабочими сменами).

$$K_{г} = \frac{T_{раб}}{T_{раб} + T_{рем}},$$

где  $T_{раб}$  – суммарная наработка всех изделий в единицах времени;

$T_{рем}$  – суммарное время, затраченное на восстановление работоспособности.

Коэффициент готовности характеризует готовность объекта к применению по назначению только в отношении его работоспособности в произвольный момент времени. Различают стационарный и нестационарный коэффициенты готовности, а также средний коэффициент готовности

*Коэффициент оперативной готовности*  $K_{о.г}$  – вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени,

кроме планируемых перерывов в его работе, и, начиная с этого момента, оно будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

$$K_{o.r} = K_r P(t_0, t_1),$$

где  $P(t_0, t_1)$  – вероятность безотказной работы изделия в интервале  $[t_0, t_1]$ .

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность объекта, необходимость применения которого возникает в произвольный момент времени, после которого требуется безотказная работа в течение заданного интервала времени.

*Коэффициент технического использования*  $K_{т.и}$  – отношение наработки изделия за определенный период эксплуатации к сумме наработки и времени, затраченного на техническое обслуживание, плановые ремонты и неплановое восстановление за тот же период эксплуатации. Рассчитывают  $K_{т.и}$  по формуле

$$K_{т.и} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{рем}} + T_{\text{ТО}}},$$

где  $T_{\text{ТО}}$  – суммарное время, затраченное на техническое обслуживание (ТО).

Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации. Коэффициент сохранения эффективности характеризует степень влияния отказов на эффективность его применения по назначению. Для каждого конкретного типа объектов содержание понятия эффективности и точный смысл показателя (показателей) эффективности задаются техническим заданием и вводятся в нормативно-техническую и (или) конструкторскую (проектную) документацию.

*Коэффициент сохранения эффективности* – отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

## 1.5. Способы описания надежности технических систем

Существуют следующие способы описания надежности технической системы:

- структурная схема надежности системы;
- функции алгебры логики;
- граф состояний;
- дифференциальные и алгебраические уравнения;
- интегральные уравнения.

## Структурная блок-схема надежности системы

Каждый элемент сложной системы изображается в виде геометрической фигуры, чаще всего прямоугольника. Прямоугольники соединяют линиями таким образом, чтобы полученная структурная схема отображала условия работоспособности. В качестве примера на рис. 1.6 приведены соответственно структурные блок-схемы надежности нерезервированной системы, состоящей из  $n$  элементов, и системы с отдельным (поэлементным) резервированием.

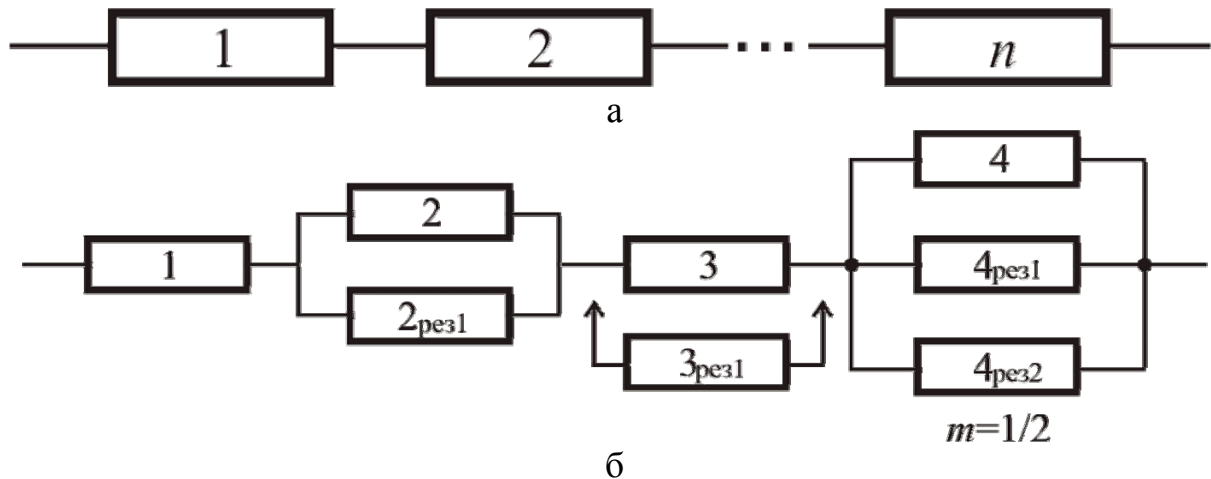


Рис. 1.6. Структурные блок-схемы надежности нерезервированной (а) и резервированной (б) систем

Из структурных блок-схем наглядно видны условия работоспособности. Система на рис. 1.6, а работоспособна, если все ее элементы исправны. Отказ любого элемента нарушает работоспособность системы, наступает ее отказ. Система на рис. 1.6, б работоспособна, если исправным является элемент 1 и любой один элемент дублированных пар, а также два любых элемента из трех резервированных с дробной кратностью  $m = 1/2$ .

Высокая наглядность – основное достоинство этого метода. Его недостатком является неполная информация о надежности системы. Например, из рис. 1.6 не ясно: ремонтируемая или неремонтируемая система, дублирование осуществлено равнонадежными элементами или нет, какова дисциплина обслуживания системы, если она ремонтируемая (количество ремонтных бригад, приоритетность обслуживания).

Эти и ряд других недостатков требуют дополнительных описаний условий работоспособности системы. Только при этих условиях можно выполнить анализ системы по критериям надежности. Следует также иметь в виду, что структурная блок-схема не является математической моделью функционирования системы.

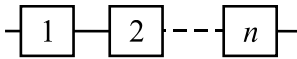


Рис. 1.7. Структурная блок-схема надежности последовательной системы

На рис. 1.7 представлена структурная блок-схема надежности последовательной системы. Если на вход такой схемы подать сигнал и условно предположить, что исправные элементы пропускают его, а неисправные – нет, то на выход схемы входной сигнал пройдет только в случае безотказной работы всех элементов системы. Вероятность безотказной работы данной системы равна:

$$P_{\text{посл.}} = P(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n),$$

где  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – события, заключающиеся в безотказной работе соответствующего элемента системы.

Если безотказная работа одного элемента не влияет на вероятность безотказной работы другого элемента, то

$$P_{\text{посл.}} = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \dots \cdot P(A_n).$$

На рис. 1.8 показана структурная блок-схема надежности параллельной системы. Вероятность безотказной работы данной системы равна:

$$P_{\text{пар.}} = P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = 1 - P(\bar{A}_1 \cdot \bar{A}_2 \cdot \dots \cdot \bar{A}_n),$$

где  $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \dots, \bar{A}_n$  – события, заключающиеся в отказе соответствующего элемента системы.

На рис. 1.9 изображена структурная блок-схема надежности системы типа « $m$  из  $n$ » при  $m=2$  и  $n=5$ , т.е. системы типа «2 из 5». Эта система работоспособна, если из пяти её элементов работают любые два, три, четыре или все пять (на схеме пунктиром обведены функционально необходимые два элемента, причем выделение элементов 1 и 2 выполнено произвольно, в действительности все пять элементов равнозначны). Вероятность безотказной работы системы типа « $m$  из  $n$ » равна:

$$P_{m \text{ из } n} = \sum_{k=m}^n C_n^k (1 - P_1)^{n-k},$$

где  $C_n^k$  – биномиальный коэффициент, равный числу сочетаний по  $k$  из  $n$ ;

$P_1$  – вероятность безотказной работы первого элемента.

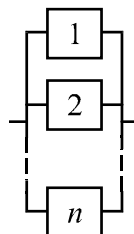


Рис. 1.8. Структурная блок-схема надежности параллельной системы

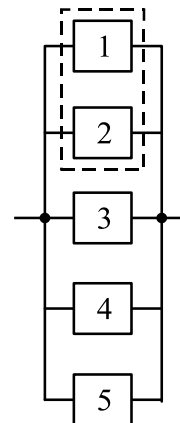


Рис. 1.9. Структурная блок-схема надежности системы типа «2 из 5»

На рис. 1.10 представлена структурная блок-схема надежности мостиковой системы. Работоспособность этой системы будет утрачена при одновременном отказе элементов (1 и 2), или (4 и 5), или (2, 3 и 4) и т.д. В то же время отказ элементов (1 и 5), или (2 и 4), или (1, 3 и 4), или (2, 3 и 5) к отказу системы не приводит.

На рис. 1.11 приведена структурная блок-схема надежности комбинированной системы. Вероятность безотказной работы данной системы равна:

$$P = P((A_1 + A_2 + A_3) \cdot A_4) =$$

$$= (1 - (1 - P(A_1)) \cdot (1 - P(A_2)) \cdot (1 - P(A_3))) \cdot P(A_4).$$

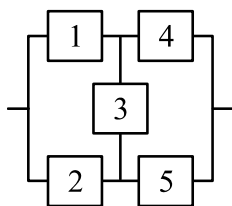


Рис. 1.10. Структурная блок-схема надежности мостиковой системы

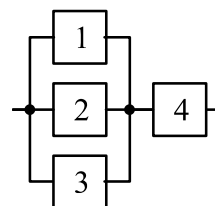


Рис. 1.11. Структурная блок-схема надежности комбинированной системы

Конечной целью расчета надежности технических устройств является оптимизация конструктивных решений и параметров, режимов эксплуатации, организация технического обслуживания и ремонтов. Поэтому уже на ранних стадиях проектирования важно оценить надежность объекта, выявить наиболее ненадежные узлы и детали, определить эффективные меры повышения показателей надежности. Решение этих задач возможно после анализа структурных схем надежности проектируемых систем. Этот анализ, как правило, включает следующие операции.

1. Система делится на элементы.
2. Определяются возможные отказы элементов, их причины и последствия.
3. Определяются показатели надёжности элементов.
4. Оценивается влияние отказов элементов на работоспособность системы.
5. Составляется структурная схема надежности технической системы.
6. По надежности элементов в соответствии со структурной схемой надежности вычисляются показатели надёжности системы.

На основании результатов расчета показателей надежности системы делаются выводы и принимаются решения об изменении или доработке элементной базы, резервировании отдельных элементов или узлов, об установлении определенного режима профилактического обслуживания, о номенклатуре и количестве запасных элементов для ремонта и т.д.

## Функции алгебры логики

Закодируем состояния каждого из элементов структурной блок-схемы двоичными переменными: 1 (элемент исправный), 0 (элемент в отказовом состоянии). Тогда функционирование системы можно описать с помощью функций алгебры логики (ФАЛ), используя операции конъюнкции, дизъюнкции и инверсии. В качестве примера составим ФАЛ, соответствующую работоспособности системы с последовательным соединением элементов. Система находится в работоспособном состоянии при условии, что все ее элементы исправны. Обозначим  $x_i$  – исправное состояние  $i$ -го элемента,  $\bar{x}_i$  – отказовое состояние. Тогда ФАЛ будет иметь вид:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1 x_2 \dots x_n.$$

Процедура получения ФАЛ может быть формализована. Одним из способов формализации является получение совершенной дизъюнктивной нормальной формы (СДНФ), исходя из таблицы истинности, соответствующей работоспособному состоянию системы.

Пусть, например, структурная блок-схема системы имеет вид, показанный на рис. 1.12. Таблица истинности приведена в табл. 1.8.

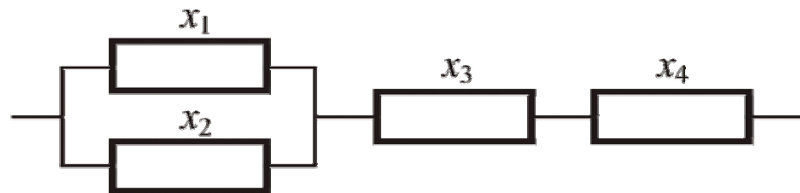


Рис. 1.12. Структурная блок-схема системы со смешанным соединением элементов

Таблица 1.8

Таблица истинности

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y$
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

Функция  $y(x_1, x_2, x_3, x_4)$  имеет значение 1 лишь на трех наборах двоичных аргументов:

- 1011 (исправными являются элементы  $x_1, x_3, x_4$ );
- 0111 (исправными являются элементы  $x_2, x_3, x_4$ );
- 1111 (все элементы исправны).

Тогда следующая СДНФ будет функцией алгебры логики, описывающей работоспособное состояние системы:

$$y(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1 \bar{x}_2 x_3 x_4 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 x_4 \vee x_1 x_2 x_3 x_4.$$

Функция алгебры логики может быть математической моделью надежности системы.

В алгебре логики установлен целый ряд законов, с помощью которых возможно преобразование логических функций (ЛФ):

- **коммутативный** (переместительный):

$$x_1 x_2 = x_2 x_1$$

$$x_1 \vee x_2 = x_2 \vee x_1$$

- **ассоциативный** (сочетательный):

$$(x_1 x_2) x_3 = x_1 (x_2 x_3)$$

$$(x_1 \vee x_2) \vee x_3 = x_1 \vee (x_2 \vee x_3)$$

Эти законы полностью идентичны законам обычной алгебры;

- **дистрибутивный** (распределительный):

$$x_1 (x_2 \vee x_3) = x_1 x_2 \vee x_1 x_3$$

$$x_1 \vee (x_2 x_3) = (x_1 \vee x_2) (x_1 \vee x_3)$$

• **закон поглощения.** В дизъюнктивной форме ЛФ конъюнкция меньшего ранга, т.е. с меньшим числом переменных, поглощает все конъюнкции большего ранга, если ее изображение содержится в них. Это же справедливо и для конъюнктивных форм:

$$x_1 \vee x_1 x_2 = x_1$$

$$x_1 (x_1 \vee x_2) = x_1$$

- **законы склеивания:**

$$x_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 = x_1$$

$$(x_1 \vee x_2) (x_1 \vee \bar{x}_2) = x_1$$

$$F x \vee F \bar{x} = F$$

$$(F \vee x) (F \vee \bar{x}) = F$$

где  $F$  – логическая функция общего вида, не зависящая от переменной  $x$ ;

- **закон свертки:**

$$x \vee F \bar{x} = x \vee F$$

$$x (F \vee \bar{x}) = x F$$

- **правило де Моргана:**

$$\overline{x_1 \vee x_2} = \bar{x}_1 \bar{x}_2$$

$$\overline{x_1 x_2} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2$$

Убедиться в тождественности приведенных зависимостей можно путем аналитических преобразований выражений или путем построения таблицы истинности для ЛФ, находящихся в левой и правой частях. Используя данные зависимости, можно преобразовывать исходные выражения в более простые (минимизировать их).

## Понятие о минимизации логических функций

Проблема минимизации логических функций решается на основе применения законов склеивания и поглощения с последующим перебором получаемых дизъюнктивных форм и выбором из них оптимальной (минимальной). Существует большое количество методов минимизации ЛФ. Все они отличаются друг от друга спецификой применения операций склеивания и поглощения, а также различными способами сокращения переборов. Среди аналитических методов наиболее известным является метод Квайна – МакКласки, среди табличных – метод с использованием диаграмм Вейча. Графические методы минимизации отличаются большей наглядностью и меньшей трудоемкостью, однако их применение эффективно при малом числе переменных  $n \leq 5$ .

Рассмотрим последовательность действий минимизации ЛФ на примере.

**Пример.** Найти минимальную дизъюнктивную форму функции, заданной таблицей истинности (табл. 1.9).

Т а б л и ц а 1.9

Таблица истинности функции  $Y=f(x_1, x_2, x_3)$

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y$
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

Эта функция интересна тем, что имеет несколько минимальных форм. По данным таблицы запишем аналитическое выражение:

$$y = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \vee \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3 \vee x_1 x_2 x_3$$

Пунктирными линиями в этом выражении отмечены пары конъюнкций, к которым можно применить операцию склеивания типа  $Fx \vee F\bar{x} = F$ . Особенно хорошо это видно при использовании диаграммы Вейча, в которой «склеиваемые» конъюнкции находятся по соседству друг с другом. Диаграмма Вейча просто по-другому интерпретирует таблицу истинности.



Т а б л и ц а 1.10

Диаграмма Вейча функции  $y$ 

	$x_2$		$\bar{x}_2$	
$x_1$	$x_1 x_2 \bar{x}_3$	$x_1 x_2 x_3 *$	$x_1 \bar{x}_2 x_3 *$	$x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 *$
$\bar{x}_1$	$\bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 *$	$\bar{x}_1 x_2 x_3 *$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 *$
	$\bar{x}_3$	$x_3$		$\bar{x}_3$

После выделения конъюнкций (они отмечены звездочкой) видно, какие конъюнкции могут образовывать пары для склеивания.

В результате применения операций склеивания и поглощения можно получить другое аналитическое выражение:

$$y = \bar{x}_1 x_2 \vee x_2 x_3 \vee x_1 x_3 \vee x_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_3,$$

в котором отсутствуют возможности дальнейших склеиваний и поглощений. Однако последнее выражение является избыточным, так как отдельные конъюнкции могут быть «лишними», т.е. их «составные части» могут включаться в другие конъюнкции. У данной функции существует пять безыбыточных дизъюнктивных форм, из которых только две являются минимальными.

$$y_1 = \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 x_3 \vee \bar{x}_2 x_3;$$

$$y_2 = \bar{x}_1 \bar{x}_3 \vee x_2 x_3 \vee x_1 \bar{x}_2.$$

Если необходимо получить минимальную ДНФ, то в карте рассматриваем только те клетки, которые отмечены звездочками; если нужна КНФ, то рассматриваем те клетки, которые не содержат звездочки. Сама минимизация производится по следующим правилам (на примере ДНФ):

- Объединяем смежные клетки, содержащие только звездочки, в область так, чтобы одна область содержала  $2^n$  ( $n$  – целое число) клеток. При этом крайние строки и столбцы тоже считаются смежными между собой.

- Область должна быть как можно больше, а количество областей как можно меньше.

- Области могут пересекаться.

- Возможно несколько вариантов покрытия.

Далее берём первую область и смотрим, какие переменные не меняются в пределах этой области, выписываем конъюнкцию этих переменных. Берём следующую область, выполняем то же самое, что и для первой, и т.д. для всех областей. Конъюнкции областей объединяем дизъюнкцией.

Минимизация «вручную» возможна только для функций, зависящих от 4–5 переменных, так как трудоёмкость переборных методов растёт в квадратичной зависимости от числа переменных. Применение мощных ЭВМ для этих целей позволяет расширить границы до  $n=12-15$ . Если при этом учесть, что функции могут быть частично определены (значения функций на неко-

торых наборах переменных можно определять произвольно), а также что иногда приходится решать задачи совместной минимизации систем ЛФ, то минимизация ЛФ становится сложной инженерной, практической и научной проблемой.

### Матрица состояний системы

В матрице состояний содержится вся информация о надежности системы. Каждая строка матрицы представляет собой вектор, компонентами которого служат признаки того, в каком состоянии пребывает каждый элемент, когда сама система находится в соответствующем данной строке состоянии. Элемент может находиться в различных состояниях (рабочее, простой). Элемент системы может находиться в состоянии простоя, которое вызвано различными причинами. Для дальнейшей работы системы необходимо знание того, вызван ли указанный простой элемента очередью на восстановление или отказом других элементов, или элемент является резервным и находится в ненагруженном состоянии и т.д. Достоинством описания системы с помощью матрицы состояний является удобство ее хранения в памяти ЭВМ или на внешнем носителе информации. При этом матрица может иметь практически любую размерность.

### Граф состояний системы

Восстанавливаемая система, состоящая из  $n$  элементов, может находиться в большом числе состояний. Например, 3-е устройство отказало, а остальные исправны; 2-е и 4-е устройства отказали, а остальные исправны, и т.д. Из-за отказов и восстановлений система в дискретные моменты времени переходит из одного состояния в другое. В процессе длительной эксплуатации она может побывать в каждом из возможных состояний многократно. Тогда ее функционирование может быть описано графом, узлам которого приписываются состояния системы, а ветвям – возможные переходы из состояния в состояние. Если в графе имеется  $n$  узлов, то среди них будет  $k$  узлов, соответствующих отказовым состояниям, и  $(n-k)$  – исправным.

Если оценивать функционирование системы до некоторого  $j$ -го состояния, например до первого ее отказа, то  $j$ -е состояние считается поглощающим. Система, попавшая в  $j$ -е состояние, уже не может перейти в другое, и в графе отсутствуют ветви переходов из этого состояния (говорят, что в такие ветви ставится экран).

Вид графа зависит от структуры системы (схемы расчета надежности), числа обслуживающих бригад и дисциплины обслуживания. Обычно узлы графа нумеруются и отмечаются (например, крестом) те, которые соответ-

ствуют отказовым состояниям системы. На графе также указываются все интенсивности переходов.

ПРИМЕР 1.1. Блок-схема надежности нерезервированной системы приведена на рис. 1.13, где приняты обозначения:

- $n$  – число элементов системы;
- $\lambda_i$  – интенсивность отказа  $i$ -го элемента;
- $\mu_i$  – интенсивность восстановления  $i$ -го элемента,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Граф состояний рассматриваемой нерезервированной восстанавливаемой системы приведен на рис. 1.14.

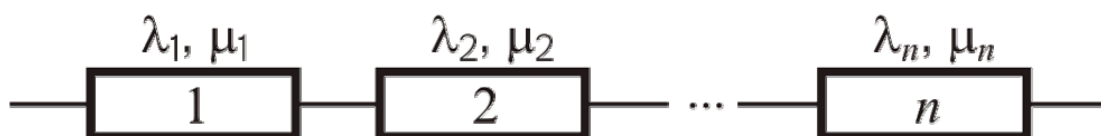


Рис. 1.13. Структурная блок-схема нерезервированной восстанавливаемой системы

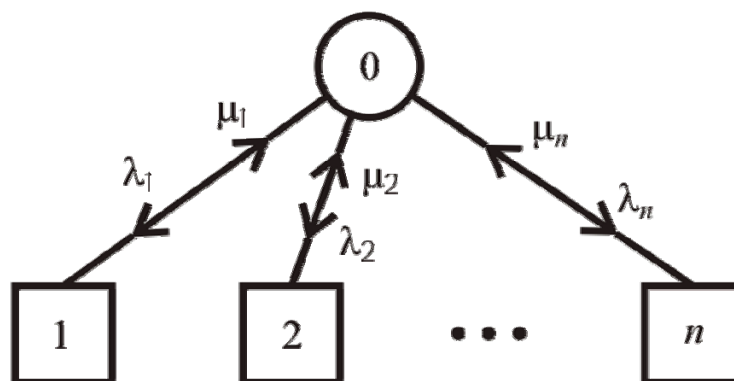


Рис. 1.14. Граф состояний нерезервированной восстанавливаемой системы

Исправное состояние обозначено (0), а отказовые пронумерованы от 1 до  $n$  и изображены квадратами. В любом  $i$ -м отказовом состоянии система не работает, а  $i$ -й элемент находится в ремонте. Очевидно, что система в  $i$ -е отказовое состояние может попасть с интенсивностью отказа  $i$ -го элемента, т.е.  $\lambda_i$ , и может быть восстановлена (возвращена в состояние (0)) с интенсивностью  $\mu_i$ .

Указанные интенсивности приведены на графе. В рассматриваемом случае вид графа и интенсивности переходов не зависят от числа обслуживающих бригад, т. к. предполагается, что после возникновения отказа одного элемента вся система не работает и отказы элементов в процессе ее восстановления не возникают.

Если необходимо проанализировать поведение системы до первого отказа, то следует считать, что состояния (1), (2), ..., (n) являются поглощающими (система, попав в эти состояния, больше не возвращается в исправное состояние (0), экран на графе состояний).

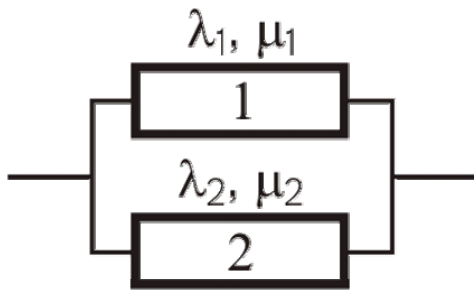


Рис. 1.15. Структурная блок-схема дублированной системы с неравнонадежными элементами

ПРИМЕР 1.2. Необходимо описать графом надежность дублированной системы, блок-схема надежности которой приведена на рис. 1.15. Рассмотрим следующие случаи:

- а) систему обслуживают две бригады;
- б) обслуживание осуществляется одной бригадой с прямым приоритетом;
- в) обслуживание осуществляется одной бригадой с обратным приоритетом;
- г) обслуживание осуществляется одной бригадой, причем первый элемент имеет высший приоритет по сравнению со вторым.

Решение. Из рис. 1.15 видно, что дублированные устройства неравнонадежны и обладают различной ремонтпригодностью. Предполагается также, что последствие отказов отсутствует. Графы состояний системы для всех случаев приведены на рис. 1.16.

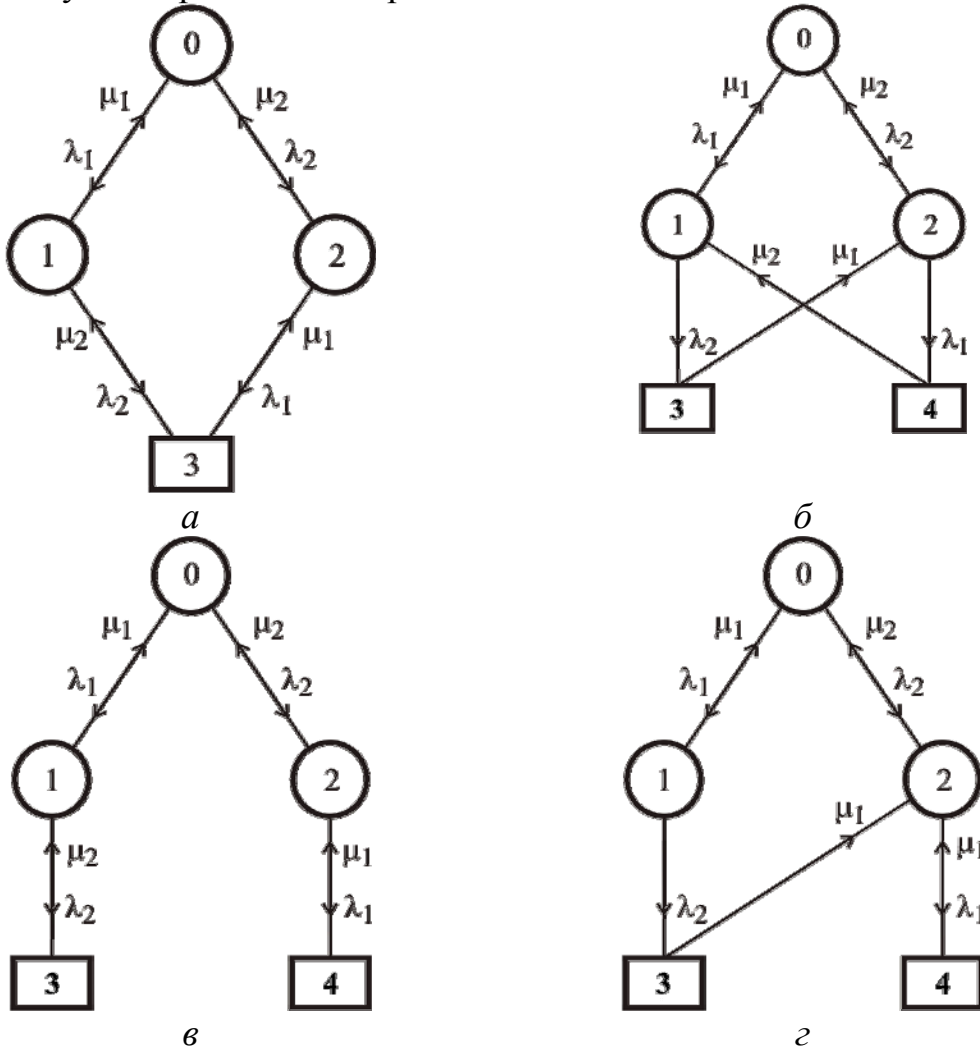


Рис. 1.16. Граф состояний дублированной системы при различных дисциплинах обслуживания

Система может находиться в следующих состояниях:

- (0) – состояние, когда оба устройства исправны;
- (1) – состояние, когда первое устройство отказало и находится в ремонте, а второе исправно;
- (2) – состояние, когда второе устройство отказало и находится в ремонте, а первое исправно;
- (3) – отказовое состояние системы, когда оба устройства неисправны; при этом в случае (а) ремонтируются и первое, и второе устройства; в случаях (б) и (г) ремонтируется первое, а второе находится в очереди на ремонт; в случае (в) ремонтируется второе, а первое находится в очереди;
- (4) – отказовое состояние, когда оба устройства неисправны, при этом в случае (б) ремонтируется второе устройство, а в случаях (в) и (г) – первое.

Рассмотрим первоначально случай (а) (см. рис. 1.16, а). В дублированной системе может отказать либо первое, либо второе устройство. Поэтому из исходного состояния (0) возможны два перехода: в состояние (1) с интенсивностью  $\lambda_1$  и в состояние (2) с интенсивностью  $\lambda_2$ . Отказавшее устройство может быть восстановлено до отказа системы, т.е. система из состояний (1) и (2) может возвратиться в исходное нулевое состояние. Может также оказаться, что до восстановления отказавшего устройства откажет еще одно, и система перейдет в отказовое состояние (3), показанное на графе квадратом. В это состояние она может попасть либо из состояния (1) с интенсивностью  $\lambda_2$  (второе устройство отказало), либо из состояния (2) с интенсивностью  $\lambda_1$  (первое устройство отказало). Так как восстановлением системы занимаются две обслуживающие бригады, то в состоянии (3) оба устройства ремонтируются независимо от того, какое из них отказало первым. Если в состоянии (3) первоначально будет отремонтировано первое устройство, то система перейдет с интенсивностью  $\mu_1$  в состояние (2), а если второе – то с интенсивностью  $\mu_2$  в состояние (1).

Случаи (б), (в), (г) отличаются от рассмотренного тем, что ремонтом дублированной системы занимается лишь одна обслуживающая бригада. При таком обслуживании в отказовом состоянии дублированной системы ремонтируется только одно из отказавших устройств, а второе находится в очереди на ремонт. А это значит, что дублированная восстанавливаемая система имеет два разных отказовых состояния, которые объединить в одно в общем случае невозможно. На рис. 1.16, б – г эти состояния обозначены (3) и (4) и показаны квадратами.

При обслуживании дублированной системы с прямым приоритетом (случай (б)) в отказовом состоянии (3) ремонтируется первое устройство, а в состоянии (4) – второе. Если будет отремонтировано первое устройство, то система перейдет в работоспособное состояние, когда первое устройство работает, а второе находится в ремонте, т.е. в состояние (2). Интен-

сивность перехода будет равна интенсивности восстановления  $\mu_1$  первого устройства. Если будет отремонтировано второе устройство, то система перейдет в работоспособное состояние, когда второе устройство работает, а первое находится в ремонте, т.е. в состоянии (1). Интенсивность перехода будет равна интенсивности восстановления  $\mu_2$  второго устройства.

При обслуживании системы с обратным приоритетом (случай (в)) в состоянии (3) ремонтируется второе устройство, а в состоянии (4) – первое, поэтому из отказов состояний (3) и (4) возможны переходы соответственно в состояние (1) с интенсивностью  $\mu_2$  и в состояние (2) с интенсивностью  $\mu_1$ .

В случае (г) первое устройство имеет приоритет в обслуживании, поэтому в отказовых состояниях (3) и (4) оно ремонтируется первым. Это означает, что переход системы из отказовых состояний (3) и (4) возможен лишь в исправное состояние (2), когда первое устройство работает, а второе находится в ремонте. Интенсивность перехода равна интенсивности восстановления  $\mu_1$  первого устройства.

Из примера следует, что вид графа зависит не только от структуры системы, но также от числа обслуживающих бригад и дисциплины обслуживания.

Из приведенных примеров видно, что граф состояний восстанавливаемой системы полностью определяется ее структурой (блок-схемой надежности), надежностью устройств, их ремонтпригодностью, числом ремонтных бригад, дисциплиной обслуживания и видом восстановления. В нем содержится вся информация о функционировании системы. Поэтому граф состояний можно рассматривать как один из способов описания надежности системы. Основными преимуществами такого описания являются наглядность и сравнительная простота.

Граф состояний сложной системы может иметь большое число узлов. В этом случае при построении графа приходится просматривать большое число возможных сочетаний отказавших элементов. Это можно выполнить при условии формализации построения графа.

#### Описание функционирования системы с помощью уравнений типа массового обслуживания

Составить систему дифференциальных уравнений типа массового обслуживания для определения количественных характеристик надежности восстанавливаемой системы можно по виду графа состояний системы. Сформулируем первоначально правило составления уравнений для определения вероятности пребывания системы в  $i$ -м состоянии в момент времени.

Часть произвольного графа с состояниями  $(i-1)$ ,  $i$ ,  $(i+1)$  показана на рис. 1.17.

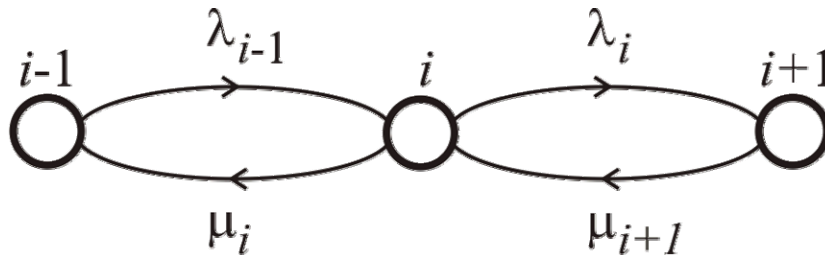


Рис. 1.17. Граф состояний

Дифференциальное уравнение для вероятности  $p_i(t)$  пребывания системы в  $i$ -м состоянии в момент времени  $t$  будет иметь вид:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \lambda_{i-1}p_{i-1}(t) - (\lambda_i + \mu_i)p_i(t) + \mu_{i+1}p_{i+1}(t).$$

Из уравнения видно, что слева пишется производная по времени от вероятности пребывания системы в  $i$ -м состоянии в момент времени  $t$ , а справа – сумма произведений интенсивностей переходов из всех соседних состояний в  $i$ -е состояние и из  $i$ -го во все состояния на соответствующие вероятности состояний. Знаки в правой части уравнения определяются по направлению стрелок в ветвях графа. Если стрелка направлена в  $i$ -е состояние, то при соответствующей интенсивности перехода ставится знак "+", в противном случае – знак "-". Это правило справедливо при любом числе соседних с  $i$ -м состояний.

**ПРИМЕР 1.3.** Составить систему дифференциальных уравнений, описывающих функционирование системы, граф состояний которой приведен на рис. 1.16, г.

**Решение.** На основании сформулированного правила и в соответствии с графом состояний система дифференциальных уравнений будет иметь вид

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0(t) + \mu_1p_1(t) + \mu_2p_2(t); \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_1p_0(t) - (\lambda_2 + \mu_1)p_1(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda_2p_0(t) - (\lambda_1 + \mu_2)p_2(t) + \mu_1p_3(t) + \mu_1p_4(t); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = \lambda_2p_1(t) - \mu_1p_3(t); \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = \lambda_1p_2(t) - \mu_1p_4(t); \end{cases} \quad (1.5)$$

Рассмотренные ранее уравнения позволяют найти вероятность того, что система в данный момент времени находится в  $i$ -м состоянии.

На практике часто приходится определять вероятность того, что в течение времени  $t$  система попадает в  $i$ -е состояние. Для определения этой вероятности необходимо считать  $i$ -е состояние поглощающим и запретить, путем постановки экранов, переходы из  $i$ -го состояния во все остальные. Преобразовав таким образом граф состояний, записывают дифференциальные уравнения по сформулированному выше правилу.

Для нашего случая состояния (3) и (4) являются отказовыми. Для определения вероятности безотказной работы дублированной системы запретим переход из состояния (3) в состояние (1), а также из состояния (4) в состояние (2). Тогда система (1.5) преобразуется в следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0(t) + \mu_1 p_1(t) + \mu_2 p_2(t); \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_1 p_0(t) - (\lambda_2 + \mu_1)p_1(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda_2 p_0(t) - (\lambda_1 + \mu_2)p_2(t); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = \lambda_2 p_1(t); \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = \lambda_1 p_2(t). \end{array} \right. \quad (1.6)$$

Укажем на одно важное свойство уравнений функционирования системы. Так как сумма всех вероятностей состояний системы равна единице, т.е.

$$\sum_{i=0}^n p_i(t) = 1, \text{ то } \sum_{i=0}^n \frac{dp_i(t)}{dt} = 0.$$

А это значит, что сумма правых частей системы уравнений всегда равна нулю. Это свойство полезно иметь в виду при проверке правильности составления уравнений функционирования системы.

Дифференциальные уравнения типа массового обслуживания позволяют определить вероятности состояний системы или вероятности попадания в эти состояния в течение времени  $t$ . По известным вероятностям  $p_i(t)$  можно найти любую другую количественную характеристику надежности системы. А это означает, что система уравнений достаточно полно описывает функционирование восстанавливаемой системы.

В установившемся режиме функционирования вероятности состояний являются величинами постоянными. Тогда все производные равны нулю и система дифференциальных уравнений превращается в систему линейных алгебраических уравнений.



Для случая, рассмотренного в примере 1.3, система дифференциальных уравнений (1.6) превращается в следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0(t) + \mu_1 p_1(t) + \mu_2 p_2(t) = 0; \\ \lambda_1 p_0(t) - (\lambda_2 + \mu_1)p_1(t) = 0; \\ \lambda_2 p_0(t) - (\lambda_1 + \mu_2)p_2(t) + \mu_1 p_3(t) + \mu_1 p_4(t) = 0; \\ \lambda_2 p_1(t) - \mu_1 p_3(t) = 0; \\ \lambda_1 p_2(t) - \mu_1 p_4(t) = 0. \end{cases} \quad (1.7)$$

Эта система является однородной (нуль в правой части каждого уравнения) и имеет бесконечное множество решений. Для получения однозначного решения системы следует использовать нормировочное уравнение

$$p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) = 1,$$

которым заменяется одно любое уравнение системы (1.7).

Анализ способов описания функционирования технических систем позволяет сделать ряд важных выводов.

Существуют по крайней мере следующие три способа описания функционирования восстанавливаемых систем:

- блок-схема надежности системы;
- граф состояний;
- система дифференциальных уравнений типа массового обслуживания.

Схема расчета надежности не позволяет в полной мере описать функционирование восстанавливаемой системы, т.к. она не дает возможности учесть дисциплину обслуживания отказавших элементов. Однако она является исходной для построения графа и для составления дифференциальных уравнений функционирования системы.

Описание функционирования восстанавливаемой системы с помощью графа состояний обладает высокой наглядностью. В этом основное преимущество данного способа перед всеми остальными. Граф состояний в ряде случаев дает возможность качественно сравнить различные схемные решения, выбрать наиболее приемлемую дисциплину обслуживания, наметить пути повышения надежности систем. Он существенно облегчает процедуру записи дифференциальных уравнений функционирования системы.

Граф состояний достаточно полно описывает функционирование восстанавливаемой системы. По графу состояний просто найти финальные вероятности пребывания системы в любом  $i$ -м состоянии, а также интегральные показатели надежности – наработку на отказ и среднее время восстановления системы. Он позволяет определить также показатели надежности невосстанавливаемых систем.

Функционирование восстанавливаемой системы можно наиболее полно описать системой дифференциальных уравнений. Решая уравнения известными в классической математике методами, вычисляем любую количественную характеристику надежности. Наличие программ решения системы дифференциальных уравнений на ЭВМ существенно расширяет возможности метода. Однако описание функционирования восстанавливаемой системы с помощью дифференциальных уравнений имеет существенные недостатки.

Метод не обладает наглядностью и требует громоздких вычислений при определении количественных характеристик надежности даже сравнительно простых систем.

Сложные системы имеют большое число состояний (сотни и тысячи). Анализ надежности таких систем путем решения уравнений типа массового обслуживания практически невозможен.

Интенсивности отказов элементов в большинстве практических случаев не являются величинами постоянными. Имеет место старение элементов и, как следствие,  $\lambda_i(t) \neq \text{const}$ . В таких случаях описание функционирования системы с помощью дифференциальных уравнений типа массового обслуживания невозможно. В этом основной недостаток метода дифференциальных уравнений. На смену им приходит метод, который в теории надежности называется методом интегральных уравнений.

## 1.6. Модели отказов изделий

Рассмотрим модели отказов невозстанавливаемых и восстанавливаемых изделий с простым техническим обслуживанием и ремонтом, проводимыми на месте эксплуатации данных изделий. Модели отказов сложных восстанавливаемых изделий, безотказность которых существенно связана с количеством и чередованием режимов функционирования, наличием и способами резервирования составных частей, разнообразием способов их технического обслуживания и ремонта, не рассматриваются.

### Термины, определения

Модель – формализованное описание сущности любой природы (явления, процесса, предмета), определенное в степени, обеспечивающей единообразное понимание специалистами.

Модель отказов – модель, определяющая механизм развития процессов, приводящих к отказу изделия.

Деградационное изменение – отдельно рассматриваемое необратимое изменение структуры изделия, ухудшающее его свойства, изменяющее параметры и характеристики.

Деградация – совокупность деградационных изменений изделия.

Процесс деградации – развитие деградации структуры изделия в течение времени.

Источник процесса деградации (ИПД) – материальный носитель в структуре изделия, на котором (в связи с которым) возникает и развивается конкретное деградационное изменение изделия.

### Виды моделей отказов

Для описания случайного характера возникновения отказов в процессе эксплуатации изделий применяют вероятностно-статистические методы. Наиболее распространенными являются модели отказов, основанные на распределении соответствующих случайных величин – наработок до отказа невосстанавливаемых изделий и наработок между отказами восстанавливаемых изделий.

Для описания отказов изделия могут быть предложены разные модели, предназначенные для решения различных задач надежности и по-разному учитывающие комплекс факторов, присущих характеру отказов (для периода приработки, периода эксплуатации, долговечности и др.).

Общими требованиями к моделям отказов являются адекватность, универсальность и удобность.

В соответствии с этими требованиями модель должна:

- учитывать значимые факторы, обоснованно пренебрегать второстепенными и использовать инженерно убедительные допущения и предположения;
- охватывать как можно большее число частных случаев и быть применимой в различных ситуациях;
- быть понятной специалистам с ординарной подготовкой и приемлемой для практического применения.

Основными видами распределения наработок изделий до отказа являются:

- экспоненциальное;
- Вейбулла;
- гамма;
- логарифмически-нормальное;
- нормальное.

Кроме перечисленных видов распределений, при решении отдельных задач применяют также специальные виды, число которых составляет несколько десятков.

Экспоненциальное распределение наработок между отказами является асимптотическим при суперпозиции (объединении) потоков отказов и при

случайном разрежении потока отказов. Это распределение применяют в основном в области радиоэлектроники и электротехники.

Распределение Вейбулла представляет собой один из трех асимптотических видов распределений экстремальных значений – минимальной порядковой статистики. Это используют для обоснования его в качестве модели отказов (модель наислабейшего звена).

Гамма-распределение представляет собой свертку экспоненциальных распределений, и его применяют в качестве модели отказов изделий с резервом.

Нормальное распределение применяют в том случае, когда наработка до отказа изделия может быть представлена в виде суммы достаточно большого числа одинаково распределенных слагаемых. Его использование неудобно из-за области отрицательных значений наработок.

Логарифмически-нормальное распределение применяют в том случае, когда развитие процесса, приводящего к отказу, можно представить в виде произведения последовательных независимых случайных величин (например, рост трещины).

#### Общий вид функции распределения наработок до отказа изделий на неограниченном и ограниченном интервалах

Функцию распределения наработок до отказа изделий на неограниченном интервале  $(0, \infty)$  определяют по формуле

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \int_0^t \lambda(x) dx \right], \quad (1.8)$$

где  $\lambda(x)$  – интенсивность отказов,

$$\lambda(x) = \frac{dF(x)}{(1 - F(x))dx}.$$

На практике функцию распределения наработок до отказа рассматривают на ограниченном интервале  $(0, b)$  и пренебрегают ее правым "хвостом" на интервале  $(b, \infty)$ . При этом интеграл в степени экспоненты в формуле (1.8) равен некоторому положительному числу  $M$ :

$$\int_0^b \lambda(x) dx = M \quad (1.9)$$

и формула (1.8) принимает вид

$$F(t) = 1 - \exp \left[ -M \int_0^t f_0(x) dx \right], \quad (1.10)$$

где  $f_0(x) = \lambda(x)/M$ .

Интеграл в формуле (1.10) увеличивается с увеличением  $t$ , и при  $t=b$  он равен единице. Этот интеграл представляет собой функцию распределения  $F_0(t)$  некоторой случайной величины  $z$ , определенной на интервале  $(0, b)$ , а  $f_0(t)$  – плотность ее распределения.

Функция распределения наработок изделий до отказа на интервале  $(0, b)$  может быть представлена в виде

$$F(t) = 1 - \exp[-MF_0(t)]. \quad (1.11)$$

Эта функция зависит от двух параметров: константы  $M$  и  $F_0(t)$  – функции распределения случайной величины  $z$ .

### Учет технологии

Уровень безотказности изделий существенно зависит от технологии их изготовления. Указанные выше модели не учитывают взаимосвязь технологии и безотказности и не раскрывают механизм формирования и развития отказов вследствие влияния технологического фактора. Для получения адекватных моделей необходимо установить зависимость видов распределений и значений их параметров от параметров, характеризующих состояние технологического процесса изготовления изделий.

### Физико-технологическая модель отказов невосстанавливаемых изделий

Предполагают, что условия и режимы эксплуатации однотипных изделий являются идентичными и различные значения наработок до отказа изделий определяются их внутренними различиями, возникающими в процессе изготовления.

Основа физико-технологической модели отказов заключается в том, что общий процесс деградации, развивающийся в изделии и в конечном счете завершающийся его отказом, представляют как случайную совокупность  $J$  из некоторого числа  $N$  потенциально возможных процессов деградационных изменений, развивающихся на соответствующих материальных носителях, входящих в структуру изделия – ИПД.

Причинами разнообразия ИПД и случайность их попадания в отдельные изделия является нестабильность любого конкретного производства, проявляющаяся в колебаниях свойств поставляемых материалов, сырья, комплектующих изделий, в ограниченной точности оборудования, в изменчивости внешних факторов, влияющих на технологический процесс, состояние рабочих мест, дисциплину труда и др.

Классификация ИПД в условиях конкретного производства зависит от возможностей системы контроля текущего состояния технологического процесса. Классификацию проводят таким образом, чтобы обеспечить от-

носительную независимость выделенных ИПД и соответствующих процессов деградиационных изменений.

В том случае, если зависимости существенны и ими нельзя пренебречь, совокупность зависимых ИПД следует рассматривать как отдельный самостоятельный ИПД.

Классификация ИПД имеет субъективный характер: одни и те же структуры, процессы и явления могут быть исследованы с большей или меньшей степенью детализации и, соответственно, отнесены к различным ИПД или к ИПД одного вида. Для одного и того же производства может быть предложено несколько способов классификации ИПД. При этом модель не должна зависеть от способа классификации ИПД.

Каждому ИПД соответствуют:

- вероятность  $p_i$  попадания в изделие;
- функция распределения времени (наработки) развития соответствующего процесса деградиационных изменений до наступления отказа изделия  $F_i(t)$  с математическим ожиданием  $T_i$ .

Для определенности нумерация ИПД, вероятностей  $p_i$ , функций распределения  $F_i(t)$  и математических ожиданий  $T_i$  упорядочена по мере возрастания значений  $T_i$ .

Если в изделии не содержится ни одного ИПД, то в этом случае его отказ наступает в результате "идеального" старения, физическая природа которого может быть произвольной. Процесс "идеального" старения развивается в каждом изделии, т.е.  $p_{N+1}=1$ , а функция  $F_{N+1}(t)$  представляет собой функцию распределения наработки изделия до предельного состояния.

Во избежание логических противоречий следует предположить, что отказы из-за "идеального" старения происходят позже, чем из-за развития процесса деградиационных изменений по всем ИПД, и на временной оси есть по крайней мере одна точка  $b$ , для которой выполняется условие  $F_i(b)=1, i=1, \dots, N; F_{N+1}(b)=0$ .

#### Распределение наработки до отказа

Условная функция распределения наработки до отказа изделия (при условии, что в нем находится конкретный набор ИПД  $J$ ) представляет собой распределение минимума фиксированного числа случайных величин

$$F_J(t) = 1 - \prod_{j=J} [1 - F_j(t)]. \quad (1.12)$$

Вероятности соответствующих наборов ИПД распределены по полиномиальному закону.

Безусловную функцию распределения наработки изделий до отказа по всем ИПД определяют по формуле полной вероятности

$$F(t) = 1 - \sum_J P_J F_J(t). \quad (1.13)$$

Эта функция представляет собой распределение минимума случайного числа случайных величин

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^{N+1} [1 - p_i F_i(t)]. \quad (1.14)$$

Особенностью формулы (1.14) как модели отказов является то, что в нее входят вероятности  $p_i$ , характеризующие текущее состояние технологического процесса.

#### Распределение наработки до отказа при малых значениях вероятностей

На практике важным является случай, когда вероятности достаточно незначительны и, кроме того, они имеют приблизительно одинаковые значения, т.е. ИПД классифицированы с приблизительно одинаковой степенью детальности и среди них нет такого, который превалировал бы над всеми остальными ИПД.

Большое значение  $p_i$  говорит о том, что данный ИПД рассмотрен недостаточно подробно и его следует подразделить на несколько ИПД с меньшими значениями вероятностей (если это возможно), или о том, что необходимо обеспечить корректирующие изменения технологического процесса, уменьшающие значение такой вероятности. Если это сделать невозможно, то такой ИПД следует отнести к "идеальному" старению, так как он "блокирует" проявление в изделиях других, более мелких ИПД, развитие процессов деградации которых завершается отказом изделия при более длительных наработках.

При этом условии формулу (1.14) можно преобразовать следующим образом:

$$\ln[1 - F(t)] \approx - \sum_{i=1}^N p_i F_i(t) \quad \text{при } t < b,$$

$$\ln[1 - F(t) + F_{N+1}(t) \prod_{i=1}^N (1 - p_i)] \approx - \sum_{i=1}^N p_i \quad \text{при } t > b,$$

при любых значениях наработок.

Это преобразование не подходит для распределения минимума фиксированного числа случайных величин в соответствии с формулой (1.12) при больших значениях наработок.

Формула распределения наработки до отказа изделия

$$F(t) = 1 - e^{-MF_0(t)} + e^{-M} F_{N+1}(t), \quad (1.15)$$

где

$$M = \sum_{i=1}^N p_i, \quad (1.16)$$

$$F_0(t) = \sum_{i=1}^N \frac{p_i}{M} F_i(t). \quad (1.17)$$

Функция распределения наработки до отказа изделия, определенная по формуле (1.15), соответствует формуле (1.11).

Параметр  $M$ , определенный по формуле (1.16), равен среднему числу ИПД, попадающих в одно изделие в процессе его изготовления.

Функция  $F_0(t)$  описывает смесь распределений развития процессов деградации по всем ИПД.

**Примечания:**

- В смеси распределений каждый ИПД учитывают с вероятностью, равной ее доле в суммарной вероятности всех ИПД, потенциально возможных в условиях данного технологического процесса.

- Инвариантность параметра  $M$  и функции  $F_0(t)$  к способу классификации ИПД проявляется в следующем. Более детальная классификация ИПД в интервале наработок  $(0, b)$  приводит к увеличению числа  $N$ , но при этом уменьшаются значения вероятностей  $p_i$  так, что среднее число ИПД остается постоянным. Увеличение числа ИПД, уменьшение вероятностей  $p_i$  и изменение вида функций  $F_i(t)$  происходит взаимозависимо таким образом, что функция смеси  $F_0(t)$  сохраняет свой вид.

Погрешность формулы (1.15) зависит от числа  $N$ . Наибольшая погрешность имеет место при  $N=1$ , когда в изделие может попасть только один ИПД. При условии незначительности соответствующей вероятности это означает, что классификация проведена неудачно. Большинство изделий не содержит данного ИПД, и поведение их наработки до отказа определяется "идеальным" старением.

Погрешность быстро уменьшается с увеличением  $N$  и становится практически незначимой при  $N=5...7$ .

#### Аппроксимация модели

Вид распределения наработки до отказа изделий  $F(t)$  определяется видом функции  $F_0(t)$ , которая характеризует технологический процесс с позиций безотказности. Если предположить, что каждое распределение  $F_i(t)$  зависит только от двух параметров, то с учетом вероятностей  $p_i$  общее число  $F_0(t)$  параметров функции будет равно  $3N$ . Функцию с таким числом параметров не применяют, и ее следует аппроксимировать.

Рассматривают ступенчатую функцию  $F_{0s}(t)$ , где по оси абсцисс отложены упорядоченные по возрастанию средние значения наработок  $T_i$ , а по оси ординат – соответствующие нормированные вероятности  $p_i/M$ .



Функция  $F_0(t)$  отличается от функции  $F_{0S}(t)$  "сглаженностью" ступеней (скачков), но при этом общий характер поведения обеих функций во всем диапазоне изменения наработок является одинаково удобным для выбора аппроксимирующей функции  $F_{0A}(t)$  с одним, двумя или тремя параметрами.

В условиях конкретного производства строят ступенчатую функцию  $F_{0S}(t)$ , соответствующую принятой системе контроля состояния технологического процесса, а в качестве аппроксимирующей ее функции используют любую непрерывную функцию  $F_{0A}(t)$ , приемлемым образом сглаживающую  $F_{0S}(t)$ .

**Примечание.** Устойчивость модели к способам классификации ИПД выражается в том, что разные функции  $F_{0Si}(t)$ , соответствующие разным  $i$  классификациям, как и сама функция  $F_0(t)$ , могут быть в одинаковой степени "хорошо сглажены" одной и той же аппроксимирующей их функцией  $F_{0A}(t)$ .

Способ выбора аппроксимирующей функции изображен на рис. 1.18.

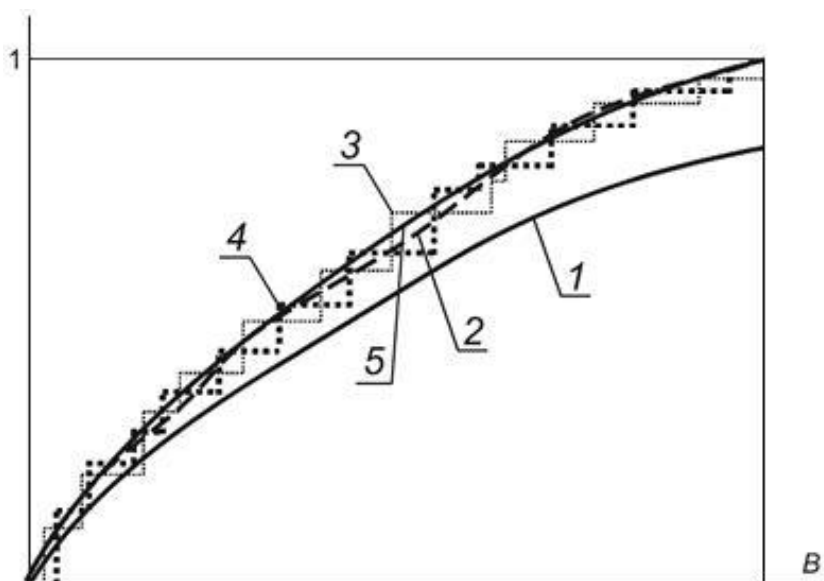


Рис. 1.18. Пример к аппроксимации модели:  
 1 — функция распределения наработок изделий до отказа  $F(t)$  на интервале  $(0, b)$ ;  
 2 — функция  $F_0(t)$ ; 3 и 4 — две ступенчатые функции  $F_{0S}(t)$ , соответствующие двум разным способам классификации ИПД;  
 5 — аппроксимирующая функция  $F_{0A}(t)$

### Основные аппроксимации распределения наработок до отказа

*Однопараметрическая аппроксимация.* Наиболее простая аппроксимирующая функция  $F_{0A}(t)$  представляет собой равномерное распределение на интервале  $(0, b)$

$$F_{0A}(t) = t/b.$$

Так получают экспоненциальное распределение наработок изделий до отказа

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{M}{b}t} + e^{-M} F_{N+1}(t). \quad (1.18)$$

При увеличении значения  $b$  увеличиваются значения  $N$  и  $M$  в результате выявления новых ИПД. Формула (1.18) сохраняет свой вид, если отношение  $M/b$  остается постоянным, а значение последнего слагаемого в правой части формулы (1.18) стремится к нулю.

*Двухпараметрическая аппроксимация.* Если моменты завершения процессов деградиационных изменений по всем ИПД распределены не равномерно на интервале  $(0, b)$ , а со смещением их концентрации в ту или иную сторону – к нулю или к значению  $b$ , то наиболее просто это может быть учтено путем добавления в аппроксимирующее равномерное распределение параметра формы  $\alpha$

$$F_{0A}(t) = (t/b)^\alpha.$$

В результате получают распределение Вейбулла наработок до отказа изделий

$$F(t) = 1 - e^{-M\left(\frac{t}{b}\right)^\alpha} + e^{-M} F_{N+1}(t). \quad (1.19)$$

*Аппроксимация при большом числе параметров.* Если изделие имеет период приработки и интенсивность отказов постепенно снижается до некоторого постоянного уровня, структуру изделия можно представить в виде последовательного соединения двух элементов:

- совокупности ИПД, функцию  $F_{0A1}(t)$  которой аппроксимируют равномерным распределением;
- совокупности ИПД, функцию  $F_{0A2}(t)$  которой аппроксимируют степенным распределением с параметром  $\alpha < 1$ .

Таким образом, данный случай сводится к комбинации двух предыдущих случаев – экспоненциального и Вейбулла распределений.

Аналогично аппроксимируют распределение наработок до отказа в том случае, когда интенсивность отказов возрастает (приближение периода старения). Структуру изделия представляют в виде последовательного соединения двух элементов:

- совокупности ИПД, функцию  $F_{0A1}(t)$  которой аппроксимируют равномерным распределением;
- совокупности ИПД, функцию  $F_{0A2}(t)$  которой аппроксимируют степенным распределением с параметром  $\alpha > 1$ .

## Следствия применения физико-технологической модели

*Особенности распределений наработок до отказа.* В результате постоянных изменений (колебаний, тренда) параметров технологического процесса, неизбежных в той или иной степени в условиях любого производства, соответственно флуктуируют, изменяются значения вероятностей  $p_i$ . Таким образом, непосредственно из модели следует, что в вероятностном смысле распределения наработок до отказа не существуют.

Условно можно говорить о "мгновенном" распределении наработок до отказа, имеющем место в каком-либо текущем моменте времени (состоянии) технологического процесса, либо об усредненном за некоторый период времени распределении, пренебрегая различного рода зависимостями наработок.

Относительно устойчивый вид распределения наработок до отказа может быть только в условиях достаточно стабильного (необязательно качественного) производства, характеризующегося достаточно постоянными значениями  $p_i$ .

Физический фактор в модели представляют времена развития процессов деградации до отказа, значения которых определяются природными (физическими) закономерностями, не зависящими от производства.

Технологический фактор представляют вероятности попадания отдельных ИПД в изделия, значения которых определяются состоянием производства.

Из двух факторов технология в большей степени оказывает формирующее влияние на вид распределения наработок до отказа. Вид распределения наработок до отказа определяется не конструкцией изделия, а состоянием технологического процесса.

В тех случаях, когда распределение наработок до отказа может возникнуть в условиях стабильного производства, его вид является многопараметрическим и неприемлем для математического описания. Истинный вид такого распределения, даже если он существует, в описании надежности не используют.

Однопараметрическое экспоненциальное и двухпараметрическое Вейбулла распределения представляют собой наиболее простые аппроксимации истинных распределений наработок изделий до отказа. Аппроксимационная интерпретация экспоненциального и Вейбулла распределений раскрывает их универсальные для описания надежности свойства в дополнение к асимптотическим интерпретациям суперпозиции потоков отказов и минимальной порядковой статистики.

Характеристическое свойство экспоненциального распределения, состоящее в том, что распределение безотказно проработавшего в течение некоторого периода времени изделия совпадает с распределением нового

изделия, трактуется как "нестарение", что является противоестественным для невозстановливаемых изделий.

Из физико-технологической модели следует иное объяснение характеристического свойства. При невыявленном составе ИПД в отдельном изделии невозможно указать, какие из процессов деградации в нем развиваются и что с ним произойдет в дальнейшем, однако это не означает, что изделие не стареет.

Важной характеристикой является интенсивность отказов, имеющая следующее математическое определение: интенсивность отказов – предел отношения условной вероятности того, что момент возникновения отказа попадет в заданный интервал  $(t+\Delta t)$ , к длине этого интервала  $\Delta t$ , стремящейся к нулю, при условии того, что до начала этого интервала изделие находилось в работоспособном состоянии:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t(1 - F(t))}.$$

Физико-технологическая модель дополняет математическое определение инженерным определением: интенсивность отказов представляет собой произведение среднего числа ИПД, попадающих в одно изделие, и плотности распределения смеси распределений развития процессов деградации по всем ИПД:

$$\lambda(t) = Mf_0(t).$$

Характерной особенностью функции распределения наработок до отказа является нарастание неопределенности по мере перемещения к ее правому "хвосту". Данная неопределенность проявляется в усложнении классификации мелких ИПД, приводящих к "поздним" отказам, выявлении факторов, приводящих к возникновению таких ИПД, утрате возможности осуществлять корректирующие изменения технологического процесса по стабилизации вероятностей попадания мелких ИПД в изделия и, наконец, в неопределенности, связанной с переходом от мелких ИПД к "идеальному" старению.

*Управление безотказностью в процессе производства.* Использование физико-технологической модели дает возможность контролировать уровень безотказности изготавливаемых изделий путем оценки параметра  $M$  и функции  $F_0(t)$  по параметрам технологического процесса. Для этого следует провести классификацию ИПД, определить вероятность их попадания в изделия и продолжительности развития соответствующих деградационных изменений до отказа изделия. Эта работа требует проведения исследований, подготовки производства и последующей постоянной поддержки.

Преимущество данного способа контроля заключается в использовании дополнительной информации, что позволяет существенным образом сокра-

тить объемы испытаний на безотказность. При этом результаты контроля могут быть точнее результатов, полученных при испытаниях ограниченного объема.

Данный способ является перспективным для совершенствования производственных способов контроля надежности.

Взаимосвязь модели отказов с параметром  $M$  и функцией  $F_0(t)$  позволяет проследить и учитывать изменение этих параметров во времени, повышать безотказность изделий по мере отладки производства, управлять безотказностью, вовремя вводить в технологический процесс корректирующие изменения.

Контроль безотказности изделий по параметрам технологического процесса можно рассматривать как специальный вид форсированных испытаний.

В процессах нормального и форсированного испытаний остаются неизменными совокупность потенциально возможных ИПД данного производства и вероятности  $p_i$  попадания отдельных ИПД в изделия, а изменяются (обычно уменьшаются) значения средних продолжительностей развития процессов деградации до наступления отказа  $T_i$  по всем ИПД, причем в разной степени (с различными коэффициентами ускорения  $k_i$ ), в зависимости от вида ИПД.

По результатам форсированных испытаний определяют совокупность значений коэффициентов ускорений физических процессов деградации, развивающихся на соответствующих ИПД. Коэффициент ускорения испытаний определяют путем расчетов по значениям коэффициентов ускорений  $k_i$  и вероятностям  $p_i$ .

Коэффициент ускорения  $k_i$  является постоянной величиной, поскольку касается физической стороны дела (природы явлений), и после первоначального определения его следует только уточнять. Форсированные испытания приобретают в рамках физико-технологической модели отказов характер исследовательских испытаний, направленных на повышение достоверности результатов контроля надежности по параметрам технологического процесса изготовления изделий.

### Модели отказов восстанавливаемых изделий

Поток отказов восстанавливаемых изделий представляет собой суперпозицию потоков отказов элементов. При незначительных и, как правило, соответствующих практике предположениях наработки между соседними отказами в объединенном потоке аппроксимируют экспоненциальным распределением.

Статистические данные о наработках между отказами многоэлементных и сложных восстанавливаемых изделий характеризуются коэффициентами вариации, значения которых более 1. Это происходит потому, что

реальный поток отказов изделий, наряду с суперпозицией потоков отказов элементов, содержит также "дополнительные" отказы, возникающие в следующих случаях.

Не всегда отказавший элемент является причиной отказа изделия. Он представляет собой форму проявления отказа, а причина может заключаться в чем-то другом. Чем сложнее изделие, тем чаще бывают случаи, когда замена отказавшего элемента устраняет не основную причину отказа, а только его последствия. Подобные случаи обычно происходят несколько раз (подряд или попеременно с другими отказами) до тех пор, пока обслуживающий персонал не обратит на них внимание, и не обнаружит и не устранит основную причину.

Новый элемент, установленный вместо отказавшего, может иметь скрытый дефект, который также проявится повторным отказом через непродолжительное время после возобновления работы изделия.

Возможны случаи неумышленного создания неполадок персоналом, устраняющим очередную неисправность, в результате чего изделие отказывает через некоторое время после возобновления работы.

Среди указанных причин доминирующая роль принадлежит первой. Число дополнительных отказов тем больше, чем сложнее изделие. Эти отказы, с одной стороны, уменьшают значение средней наработки на отказ изделия, а с другой стороны, приводят к увеличению доли "коротких" наработок между отказами, по сравнению с экспоненциальным распределением.

Функция распределения наработок между отказами сложных восстанавливаемых изделий характеризуется убывающей со временем интенсивностью отказов. Физически это может быть объяснено следующим образом: если после очередного восстановления изделие сохраняет свою работоспособность в течение все большего периода времени, то это свидетельствует о том, что при данном восстановлении не произошло каких-либо из указанных выше событий, приводящих к дополнительным отказам.

Фактор дополнительных отказов является существенным и требующим учета при прогнозировании безотказности сложных изделий.

#### **Выбор функции распределения наработки до отказа изделия, не содержащего резервных элементов**

Рекомендации по выбору функции распределения наработки до отказа изделия в зависимости от характера процессов, развивающихся в изделии, и факторов, влияющих на характер процессов, приведены в табл. 1.11.

Т а б л и ц а 1.11

Зависимости от характера процессов, развивающихся в изделии, и факторов, влияющих на характер процессов

Характер процессов, развивающихся в изделии	Факторы, влияющие на характер процессов	Вид функции распределения
В изделии развивается один основной процесс деградации, приводящий к отказу. Доля отказов, происходящих из-за других причин, незначительна (до 10%)	Простая конструкция изделия. Число технологических операций при изготовлении незначительно. Простая, хорошо освоенная технология изготовления. Высокий уровень производства	Вид функции распределения определяется характером основного процесса. При аппроксимации распределением Вейбулла параметр формы принимает значение больше единицы (от 1,3 до 3,0 и более)
В изделии развиваются несколько независимых процессов деградации. Доля отказов, происходящих из-за других причин, незначительна (до 10%)	Относительно простая конструкция изделия. Число технологических операций незначительно. Простая, хорошо освоенная технология изготовления. Высокий уровень производства	Функция распределения представляет собой распределение минимума фиксированного числа случайных величин в соответствии с формулой (5)
В изделии преобладают один или несколько процессов деградации. При этом значительное число отказов связано с другими процессами деградации, вид и число которых в отдельном изделии оказываются случайными	Относительно сложная конструкция изделия. Недостаточно освоенная технология изготовления	Функция распределения представляет собой распределение минимума двух случайных величин, одна из которых имеет распределение по 1 или 2 настоящей таблицы, а другая – экспоненциальное распределение
Процесс деградации представляет собой случайную совокупность процессов деградации различного вида из большого числа потенциально возможных процессов деградации	Сложная конструкция. Большое число технологических операций. Хорошо освоенная технология изготовления	Точный вид функции распределения на практике не используют. Аппроксимируют экспоненциальным распределением или распределением Вейбулла
	Сложная конструкция. Большое число технологических операций. Недостаточно освоенная технология изготовления	Точный вид функции распределения на практике не используют. Аппроксимируют распределением вейбулла с параметром формы меньше единицы, увеличивающимся по мере освоения технологии

## Анализ видов, последствий и критичности отказов

*Анализ видов и последствий отказов (АВПО)* – формализованная, контролируемая процедура качественного анализа проекта, технологии изготовления, правил эксплуатации и хранения, системы технического обслуживания и ремонта изделия, заключающаяся в выделении на некотором уровне разукрупнения его структуры возможных (наблюдаемых) отказов разного вида, в прослеживании причинно-следственных связей, обуславливающих их возникновение, и возможных (наблюдаемых) последствий этих отказов на данном и вышестоящих уровнях, а также в качественной оценке и ранжировании отказов по тяжести их последствий.

*Анализ видов, последствий и критичности отказов (АВПКО)* – процедура АВПО, дополненная оценками показателей критичности анализируемых отказов.

Цели проведения АВПКО – обоснование, проверка достаточности, оценка эффективности и контроль за реализацией управляющих решений, направленных на совершенствование конструкции, технологии изготовления, правил эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта объекта и обеспечивающих предупреждение возникновения и/или ослабление тяжести возможных последствий его отказов, достижение требуемых характеристик безопасности, экологичности, эффективности и надежности.

### Задачи, решаемые при проведении АВПКО

В процессе АВПКО решают следующие задачи:

- выявляют возможные виды отказов составных частей и изделия в целом, изучают их причины, механизмы и условия возникновения и развития;
- определяют возможные неблагоприятные последствия возникновения выявленных отказов, проводят качественный анализ тяжести последствий отказов и/или количественную оценку их критичности;
- составляют и периодически корректируют перечни критичных элементов и технологических процессов;
- оценивают достаточность предусмотренных средств и методов контроля работоспособности и диагностирования изделий для своевременного обнаружения и локализации его отказов, обосновывают необходимость введения дополнительных средств и методов сигнализации, контроля и диагностирования;
- вырабатывают предложения и рекомендации по внесению изменений в конструкцию и/или технологию изготовления изделия и его составных частей, направленные на снижение вероятности и/или тяжести последствий отказов, оценивают эффективность ранее проведенных доработок;



- оценивают достаточность предусмотренных в системе технологического обслуживания контрольно-диагностических и профилактических операций, направленных на предупреждение отказов изделий в эксплуатации, вырабатывают предложения по корректировке методов и периодичности технического обслуживания;
- анализируют правила поведения персонала в аварийных ситуациях, обусловленных возможными отказами изделий, предусмотренные эксплуатационной документацией, вырабатывают предложения по их совершенствованию или внесению соответствующих изменений в эксплуатационную документацию при их отсутствии;
- проводят анализ возможных (наблюдаемых) ошибок персонала при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте изделий, оценивают их возможные последствия, вырабатывают предложения по совершенствованию человеко-машинных интерфейсов и введению дополнительных средств защиты изделий от ошибок персонала, по совершенствованию инструкций по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту изделий.

#### Взаимосвязь АВПКО с другими элементами и задачами программ обеспечения надежности

Проведение АВПКО не отменяет необходимости выполнения расчетов надежности объекта в соответствии с общими требованиями ГОСТ 27.301.

Планирование и выполнение расчетов надежности и АВПКО должны осуществляться так, чтобы указанные элементы ПОН дополняли друг друга и взаимно служили источниками исходных данных. При этом по результатам АВПКО уточняют критерии отказов объекта, модели, применяемые при расчете его надежности, задачи и содержание технического обслуживания и ремонта объекта, а методы и результаты расчетов надежности используют для оценки вероятностей отказов объекта, учитываемых при анализе их критичности.

АВПКО должен также обеспечивать получение исходных данных для:

- планирования экспериментальной отработки объектов; уточнения распределения требований надежности между составными частями объекта, внесения соответствующих изменений и дополнений в ПОН составных частей;
- установления и уточнения требований по приспособленности объекта к диагностированию (контролепригодности) и его ремонтпригодности;
- отработки (совершенствования) технологии изготовления объекта, включая планирование программы отбраковочных испытаний объекта и его составных частей в процессе производства;

- планирования системы технического обслуживания и ремонта объекта, обработки эксплуатационной и ремонтной документации;
- составления (совершенствования) программ обучения и тренировки эксплуатационного и ремонтного персонала, правил его поведения в аварийных ситуациях.

### Использование результатов АВПКО

Результаты АВПКО учитывают:

- при принятии решений о завершенности этапов видов работ на стадиях жизненного цикла объектов, включая приемку ОКР по разработке объектов;
- при сертификации объектов для проверки достаточности принятых при их разработке и изготовлении мер по обеспечению безопасности.

### Основные принципы АВПКО

АВПКО в общем случае представляет собой сочетание качественного анализа видов и последствий отказов объекта с количественными оценками критичности выявляемых при АВПО возможных или наблюдаемых при испытаниях и в эксплуатации отказов.

В процессе АВПО проводят предварительную количественную оценку и ранжирование выявленных возможных (наблюдаемых) отказов объектов по тяжести их последствий с целью определения необходимости дальнейшего углубленного анализа и оценки их критичности и очередности проведения соответствующих доработок объекта, технологии его изготовления, системы технического обслуживания и ремонта.

Для обеспечения объективности и сопоставимости качественных оценок последствий отказов до проведения АВПКО объекта должна быть выработана система классификации отказов по категориям тяжести их возможных последствий. Указанная система может быть выработана применительно к конкретному объекту и приведена в методике его АВПО либо установлена в соответствующем нормативном документе, распространяющемся на группу (вид, тип) объектов.

При категорировании отказов по тяжести их последствий должны учитываться следующие факторы в различных сочетаниях:

- опасность отказа (с учетом немедленных и отдаленных последствий) для жизни и здоровья людей (в том числе не связанных непосредственно с эксплуатацией объекта), для окружающей среды, для целостности и сохранности самого объекта, другого имущества и материальных объектов;
- влияние отказа на качество функционирования объекта и полноту выполнения им назначенных функций, возможный ущерб любого вида (материальный, моральный, политический и др.), обусловленный снижением качества функционирования объекта или невыполнением объектом определенных функций (поставленных задач);

- скорость развития неблагоприятных последствий отказа, определяющая возможность принятия соответствующих мер защиты от них.

При АВПО может проводиться предварительная качественная оценка ожидаемой (наблюдаемой) частоты наступления отказов разных категорий тяжести при эксплуатации объектов. Указанные оценки используют:

- для ранжирования отказов по очередности необходимых доработок объекта с целью их предупреждения с использованием матриц "вероятность отказа – тяжесть последствий";

- для построения шкал балльных оценок критичности отказов.

Критичность отказов при АВПКО оценивают с использованием показателей, учитывающих для каждого анализируемого отказа объекта:

- вероятность его возникновения за время эксплуатации;
- условные вероятности наступления всех возможных неблагоприятных последствий отказа, если он может сопровождаться несколькими различными по характеру и тяжести последствиями;
- размер возможного ущерба в результате наступления каждого из ожидаемых последствий отказов.

В общем случае показатель критичности отказа представляет собой произведение его вероятности на средневзвешенный по условным вероятностям проявления последствий отказа размер ущерба от него, хотя возможно применение иных способов измерения критичности отказов.

Значения вероятностей отказов, учитываемые при оценке их критичности, рассчитывают (прогнозируют) принятыми в расчетах надежности методами с учетом структуры объекта, уровней нагруженности и режимов работы его элементов по имеющимся справочным или экспериментальным данным об их надежности. Возможные последствия каждого отказа определяют по результатам АВПО объекта, а соответствующие условные вероятности наступления каждого последствия рассчитывают на основе моделей типа "дерева событий" или прогнозируют экспертными методами.

Для определения возможного ущерба от наступления определенных последствий каждого отказа в АВПКО применяют:

- относительные балльные оценки с использованием соответствующей шкалы, разработанной применительно к конкретному объекту и установленной в методике его АВПКО либо содержащейся в соответствующем нормативном документе по АВПКО группы (вида, типа) объектов;

- показатели, представляющие числовые характеристики соответствующих функций потерь, например распределения ущерба от отказов в денежном или ином натуральном выражении, и оцениваемые методами прогнозирования по априорным данным или путем моделирования возникающих в результате отказа аварийных ситуаций – пожаров, взрывов, выбросов отравляющих или радиоактивных веществ и др.

Балльные оценки возможного ущерба от отказов применяют для объектов, абсолютные оценки последствий отказов которых невозможны или нецелесообразны по этическим, техническим или экономическим соображениям.

### Порядок анализа

Необходимость проведения АВПКО конкретного объекта определяют по согласованию заинтересованных сторон при выработке требований к программе обеспечения его надежности, включаемых в контрактные документы (техническое задание, договор и др.).

Рекомендуется предусматривать проведение АВПКО для объектов:

- у которых возможны отказы, представляющие угрозу безопасности людей, опасного загрязнения окружающей среды, значительного экономического или иного ущерба;

- прямое экспериментальное подтверждение соответствия которых установленным требованиям безопасности и надежности технически невозможно или экономически нецелесообразно и проводится расчетными или расчетно-экспериментальными методами;

- которые являются объектами обязательной или добровольной сертификации. Проведение АВПКО должно быть обязательным в случае, когда отсутствуют исходные данные для применения иных методов анализа надежности объекта (расчетных и др.) или их объем и/или достоверность на рассматриваемом этапе жизненного цикла объекта признаны недостаточными.

АВПКО не проводят, если цели и задачи анализа, сформулированные выше, могут быть достигнуты (решены) другими методами, например, если при расчете надежности изучают и учитывают возможные виды отказов объекта, их последствия и критичность.

Планирование АВПКО. АВПКО проводят по плану, непосредственно включаемому в ПОН или оформленному в виде самостоятельного документа, прилагаемого к ПОН. План проведения АВПКО должен устанавливать:

- стадии жизненного цикла объекта и соответствующие им этапы видов работ, на которых проводят анализ (в дальнейшем – этапы анализа или этапы);

- виды и методы анализа на каждом этапе со ссылками на соответствующие нормативные документы и методики. При отсутствии необходимых документов план должен предусматривать разработку соответствующих методик АВПКО (АВПО) рассматриваемого объекта;

- уровни разукрупнения объекта, начиная с которого (до которого) проводят анализ на каждом этапе;

- сроки проведения анализа на каждом этапе, распределение ответственности за его проведение и реализацию результатов, сроки, формы и правила отчетности по результатам анализа;
- порядок контроля за проведением и реализацией результатов анализа со стороны руководства организации-разработчика и заказчика (потребителя).

План АВПКО должен обеспечивать взаимную увязку и согласование ПОН объекта по срокам представления, составу и содержанию необходимых исходных данных и результатов с программами обеспечения других составляющих его качества – программой обеспечения безопасности, программой эргономического обеспечения и др.

Анализ начинают с возможно более ранних этапов разработки объекта и систематически повторяют на последующих этапах по мере отработки конструкции и технологии изготовления объекта, накопления исходных данных для анализа. При проведении АВПКО на последующих этапах разработки должна быть предусмотрена проверка полноты реализации и эффективности мероприятий по доработкам, рекомендованных на предыдущих этапах.

На всех этапах анализ начинают с проведения АВПО объекта, по результатам которого принимают решения о необходимости углубленного количественного анализа и оценки критичности отдельных видов отказов.

Уровень разукрупнения объекта, начиная с которого (до которого) проводят АВПКО (АВПО) на определенном этапе его разработки, устанавливают исходя из: требуемых результатов анализа; степени отработанности конструкторской, технологической и эксплуатационной документации; наличия необходимых исходных данных; степени новизны конструкции объекта и его составных частей, технологий их изготовления, условий эксплуатации.

При прочих равных условиях чем выше уровень отработанности конструкции и технологии изготовления объекта и его составных частей, тем меньший уровень детализации допускается при анализе, и, наоборот, объекты, содержащие принципиально новые конструктивно-технологические решения, построенные на новой элементной базе, требуют углубленного, более детализированного анализа.

Для обеспечения полноты и объективности анализа возможные виды отказов составных частей и объекта в целом при АВПКО (АВПО) целесообразно первоначально устанавливать на основе существующих для объекта данного вида классификаторов отказов и неисправностей, дополняя их при необходимости видами отказов, специфичными для рассматриваемого объекта.

Требования к методике анализа. Методика АВПО (АВПКО) должна содержать:

- общую схему (алгоритм) анализа;
- формы и правила заполнения рабочих листов, применяемых при анализе;
- систему классификации отказов объекта по тяжести их возможных последствий или ссылку на соответствующий нормативный документ (при проведении АВПО);
- систему кодирования элементов, функций и видов отказов;
- показатели критичности отказов, методы оценки величин, входящих в расчетные выражения для указанных показателей;
- программные средства, применяемые при анализе, указания по их использованию, составу и содержанию вводимых данных;
- источники информации (или непосредственно сами данные), используемой при анализе и расчетах показателей критичности, требования к точности и достоверности используемых данных;
- требования к содержанию и оформлению отчетов по результатам анализа;
- требования к формам, правила составления и порядок ведения перечней критичных элементов и технологических процессов.

Отчетность по результатам анализа. По результатам АВПО (АВПКО), проведенного на каждом этапе разработки, предусмотренном планом, должен быть составлен отчет, содержащий:

- формализованное описание объекта для целей анализа с указанием уровня его разукрупнения, до которого (или начиная с которого) выполнялся анализ;
- описание метода и алгоритма анализа;
- заполненные рабочие листы, применявшиеся при анализе;
- сводные результаты анализа, включающие: перечень и классификацию возможных отказов объекта по видам, причинам и условиям возникновения, последствиям и критичности; перечни критичных элементов и технологических процессов изготовления;
- заключение о возможности перехода к следующему этапу разработки объекта или предложения по кардинальной переработке проекта, если выявленные недостатки не могут быть устранены на последующих этапах.

В отчете также приводят предложения и рекомендации, реализуемые на последующих этапах разработки и касающиеся:

- внесения изменений в конструкцию и алгоритмы функционирования объекта, направленных на снижение вероятности выявленных отказов до приемлемого уровня, или/и на повышение устойчивости функциони-

рования объекта в случае их возникновения, или на введение защиты от наиболее тяжелых последствий отказов;

- замены применяемых материалов и комплектующих изделий;
- направлений и задач экспериментальной отработки объекта, особенно в части отработки на надежность критичных элементов, проверки полноты выявления всех видов конструкционных отказов, проверки результативности внесенных изменений в конструкцию;
- изменения (введения дополнительных) средств контроля, диагностирования и индикации отказов, регламентов проверки технического состояния и технического обслуживания объектов в эксплуатации;
- введения в технологию изготовления объекта специальных мер по предупреждению, выявлению и устранению дефектов критичных элементов (повышение стабильности техпроцессов, введение дополнительных контрольных процедур, ужесточение программ отбраковки скрытых дефектов и т.п.);
- внесения в инструкции по эксплуатации соответствующих правил поведения обслуживающего персонала при возникновении критических или катастрофических отказов, нацеленных на минимизацию их последствий.

Перечни критичных элементов (технологических процессов) составляют после завершения анализа на первом этапе разработки объекта, предусмотренном планом АВПКО, систематически корректируют на последующих этапах путем исключения элементов (процессов), эффективность доработок по которым подтверждена соответствующим анализом, расчетами, экспериментальными данными, и включения в перечень вновь выявленных критичных элементов (процессов).

Перечни критичных элементов (техпроцессов) утверждает руководитель разработки по согласованию с заказчиком (потребителем), принимающий решения о любых корректировках перечней и возможности перехода к последующему этапу видов работ на стадиях жизненного цикла объекта при текущем состоянии указанных перечней.

В перечни критичных элементов включают:

- элементы, возможная тяжесть последствий отказов которых, оцениваемая качественно или количественно, превосходит допустимый для рассматриваемого объекта уровень;
- элементы, отказы которых неизбежно вызывают полный отказ объекта;
- элементы с ограниченным сроком службы (ресурсом), не обеспечивающем требуемой долговечности объекта;
- элементы, по которым в момент проведения анализа отсутствуют достоверные данные о их качестве и надежности в рассматриваемых условиях применения и/или возможных последствиях их отказов.

В перечень критичных техпроцессов включают технологические процессы, влияние которых на качество и надежность объекта и его элементов в момент проведения анализа неизвестно или недостаточно изучено.

Для каждого элемента, включенного в перечень критичных элементов, должны быть указаны:

- кодовое обозначение и ссылка на соответствующий рабочий лист АВПКО;
- причины включения в перечень (категория тяжести последствий или значение показателя критичности отказов, другие признаки критичности);
- описание возможных причин и последствий отказов;
- предлагаемые конструктивно-технологические и/или эксплуатационные меры по минимизации вероятности отказов или по снижению возможной тяжести их последствий;
- предложения по повышению устойчивости объекта к данному виду отказов;
- предложения по проведению дополнительных исследований и испытаний с целью отработки данного элемента и/или получения необходимых данных по его надежности в рассматриваемых условиях применения.

#### Методы анализа

АВПО (АВПКО) проводят одним из следующих методов: структурным; функциональным; комбинированным.

Структурные методы АВПО (АВПКО) относят к классу индуктивных методов (анализ "снизу вверх"), применяемых для относительно простых объектов, отказы которых могут быть четко локализованы, а последствия каждого отказа элементов выбранного начального уровня разукрупнения могут быть прослежены на всех вышестоящих уровнях структуры объекта.

Общая схема (алгоритм) АВПО (АВПКО) структурным методом включает следующие основные операции:

- в соответствии с планом анализа устанавливают минимальный уровень разукрупнения, с которого начинают АВПО;
- на основе функциональной блок-схемы объекта идентифицируют все элементы выбранного уровня разукрупнения;
- для каждого идентифицированного элемента данного уровня на основе имеющихся классификаторов отказов, инженерного анализа, имеющихся априорных данных, опыта и знаний исследователя составляют перечень возможных видов отказов данного элемента;
- для каждого вида отказов выбранного элемента определяют его возможные последствия на рассматриваемом и следующих уровнях структуры объекта;



- для элементов, отказы которых определенного вида непосредственно приводят к отказу объекта или снижению качества его функционирования, оценивают категорию тяжести последствий отказов (при АВПО) или рассчитывают показатели критичности (при АВПКО);

- повторяют описанные выше операции последовательно для элементов всех вышестоящих уровней разукрупнения. Последствия отказов элементов нижестоящего уровня, которые не могут быть выражены в виде влияния на функционирование элементов рассматриваемого уровня, рассматривают как самостоятельные виды отказов на этом уровне;

- выделяют отказы, категория тяжести последствий или оценки показателей критичности которых превосходят пределы, установленные планом анализа, а элементы, соответствующие этим отказам, включают в перечень критичных элементов.

Для каждого критичного элемента определяют:

- наличие и оценивают достаточность предусмотренных средств и методов обнаружения, локализации и индикации отказов;

- возможные меры, обеспечивающие сохранение работоспособности объекта при возникновении данного отказа (введение резервирования, перестраиваемая структура, изменение алгоритма функционирования), и оценивают целесообразность их введения;

- возможные меры по снижению вероятности отказов (применение в облегченном режиме, введение защиты от перегрузок, дополнительных проверок и испытаний в процессе изготовления и эксплуатации, введение профилактического обслуживания и плановых замен в эксплуатации и т.п.) и оценивают их эффективность;

- возможные способы предупреждения наиболее опасных последствий отказов (аварийная защита и сигнализация, специальные правила поведения персонала при возникновении отказов и т.п.).

При углубленном анализе возможно рассмотрение на каждом уровне разукрупнения комбинаций отказов двух и более элементов.

Функциональные методы АВПО (АВПКО) относят к классу дедуктивных (анализ по схеме "сверху вниз") методов, применяемых для сложных многофункциональных объектов, отказы которых трудно априорно локализовать и для которых характерны сложные зависимые отказы.

Общая схема (алгоритм) АВПО (АВПКО) функциональным методом включает следующие операции:

идентифицируют все функции, выполняемые объектом:

- для каждой функции на основе априорных данных, опыта исследователя, инженерного анализа и другими доступными способами определяют перечень возможных нарушений (отклонений) данной функции;

- для каждого нарушения функции качественно оценивают тяжесть возможных последствий этого нарушения (через АВПО) или количественно-ожидаемый ущерб (при АВПКО);

- выделяют критические нарушения функции, тяжесть возможных последствий которых или ущерб от которых превосходит пределы, установленные планом анализа;

- для каждого выделенного критического нарушения, принимая его возникновение в качестве "вершинного события", строят дерево отказов, охватывающее отказы элементов всех уровней разукрупнения, вплоть до нижнего уровня, установленного планом анализа;

- с помощью построенного дерева выделяют одиночные элементы, приводящие к критическому нарушению функций изделия, и сочетания элементов, совместные отказы которых ведут к указанному нарушению;

- оценивают вероятности отказов одиночных элементов и вероятности выделенных комбинаций отказов элементов, с использованием которых при проведении АВПКО рассчитывают показатели критичности соответствующих отказов (сочетаний отказов);

- составляют перечни критичных элементов в соответствии с общими правилами, изложенными выше.

Для сложных объектов АВПКО (АВПО) проводят, как правило, комбинированными методами, сочетающими элементы структурных и функциональных методов.

Независимо от применяемого метода АВПО (АВПКО) в качестве первого этапа анализа включают:

- составление перечня и описаний всех задач, выполняемых объектом в эксплуатации, и необходимых для реализации каждой задачи рабочих функций объекта в целом и его элементов вплоть до установленного для данного этапа анализа или предельно возможного уровня разукрупнения. При этом идентифицируют все элементы заданного и вышестоящего уровней, участвующие в выполнении каждой функции объекта;

- кодирование каждой функции и элементов объектов в соответствии с установленной системой кодирования;

- описание режимов и условий выполнения каждой задачи в виде временных диаграмм и циклограмм нагружения объекта и его элементов;

- составление функциональной блок-схемы объекта и структурной схемы его надежности.

## 1.7. Надежность автомобиля

Надежность автомобилей и их узлов характеризуют преимущественно средним ресурсом, гамма-процентным ресурсом до ремонта, средней суммарной трудоемкостью ТО, средней суммарной стоимостью ТО.

Повреждения и отказы автомобилей можно объединить в следующие группы: 1) износные отказы (50...70 % всех отказов двигателей); 2) усталостные повреждения (выкрашивание поверхностей, трещины, изломы и т.п.); 3) отказы, вызванные старением; 4) отказы, вызванные остаточной деформацией; 5) неисправности вследствие нарушения регулировок.

Детали автомобилей по их ресурсу могут быть разделены на следующие группы: 1) детали, по ресурсам которых назначают гарантийный пробег автомобиля. Ресурс этих деталей невозможно или экономически невыгодно создавать равным пробегу до капитального ремонта (фрикционные накладки, фильтры, сальники, шипы и т.д.); 2) детали, по ресурсу которых определяется значение ресурса до капитального ремонта. К ним относятся детали, работающие в напряженных условиях, но при отказе не влияющие на безопасность движения (шестерни, валы коробок передач, подшипники и т.д.); 3) детали, по ресурсу которых назначают значение ресурса до полного списания. К ним относятся детали шасси автомобиля, отказ которых не угрожает безопасности движения; 4) детали, ресурс которых должен превышать ресурс до полного списания. Отказ этих деталей угрожает безопасности движения (детали системы рулевого управления, детали тормозной системы и т.д.).

Показатели надежности автомобиля в значительной степени определяются условиями эксплуатации. Поэтому показатели надежности по результатам эксплуатации наиболее правильно обрабатывать методом множественного регрессионного анализа, позволяющего учесть влияние основных эксплуатационных факторов на надежность. Например, при определении потока отказов и неисправностей за определенный пробег (обычно 1000 км) учитываются такие параметры, как коэффициент использования рабочего времени, коэффициент использования грузоподъемности, коэффициент использования прицепов, коэффициент сопротивления качению, среднее значение уклона дороги, коэффициент помехонасыщенности маршрута.

### Конструктивные методы обеспечения надежности автомобиля

Эти методы делятся на 8 категорий.

1. Рационализация конструктивной схемы, заключающаяся в поиске оптимальной конструкции, позволяющей удовлетворить требования по надежности (для этого конструкция должна быть максимально простой) и по другим параметрам – токсичности, шумности, мощности и т.д. (для этого конструкцию приходится усложнять).

2. Выбор материала деталей.

3. Обеспечение эффективной конфигурации деталей. Изменением формы деталей удастся решить многие задачи повышения надежности дета-

лей: увеличение их прочности, износостойкости, жесткости, повышение уровня ремонтпригодности, улучшение теплоотвода.

4. Установление оптимальных зазоров и натягов в сопряжениях деталей. Для выбора оптимального зазора часто требуется длительная экспериментальная работа. В настоящее время зазоры в сопряжениях, а вместе с ними и толщину масляного слоя удается замерять в процессе работы испытываемой системы.

5. Выбор эксплуатационных материалов и обеспечение их качества (в двигателях – фильтрация масла, топлива и воздуха).

6. Предотвращение аномальных процессов и различного рода разрегулировок в разрабатываемой системе (в двигателях аномальными процессами являются детонационное сгорание, калильное зажигание, повышенная жесткость работы и другие отклонения от нормального процесса). Установление оптимальных характеристик рабочего процесса является важной составной частью проектирования. Контроль регулировок в ходе эксплуатации производится в основном во время ТО. В настоящее время на двигатели устанавливаются датчики для контроля параметров двигателя во время его эксплуатации. Для повышения и прогнозирования надежности целесообразно контролировать такие параметры, как температура наиболее горячих точек двигателя, появление детонационного сгорания и калильного зажигания, засоренность фильтров, состав отработавших газов, угар масла и прорыв газов в картер двигателя и др.

7. Использование восстанавливаемых деталей для повышения уровня ремонтпригодности.

8. Резервирование.

### Технологические методы обеспечения надежности автомобиля

1. Упрочнение деталей (поверхностное пластическое деформирование, термическая обработка (искусственное старение), обработка поверхностей лучом лазера).

2. Применение покрытий и наплавки.

3. Чистовая обработка деталей.

4. Подготовка поверхностей деталей к восприятию нагрузок (приработка деталей и сопряжений).

5. Контроль качества (основная задача контроля – не отбраковка брака, а предупреждение брака).

6. Автоматизация технологических процессов.

## Контрольные вопросы

1. Что называется надежностью?
2. Что называется качеством?
3. Что называется изделием, элементом, системой?
4. Какие изделия называются: а) невозстанавливаемыми; б) восстанавливаемыми?
5. Какое состояние называется: а) работоспособным; б) неработоспособным; в) исправным; г) неисправным д) предельным?
6. Что называется наработкой?
7. Что называется наработкой до отказа?
8. Что называется наработкой между отказами?
9. Что называется временем восстановления?
10. Что называется ресурсом?
11. Что называется сроком службы?
12. Что называется сроком сохраняемости?
13. Что называется остаточным ресурсом?
14. Что называется назначенным ресурсом?
15. Что называется назначенным сроком службы?
16. Что называется назначенным сроком хранения?
17. Что называется техническим обслуживанием?
18. Что называется восстановлением?
19. Что называется ремонтом?
20. Что называется обслуживаемым объектом?
21. Что называется необслуживаемым объектом?
22. Что называется восстанавливаемым объектом?
23. Что называется невозстанавливаемым объектом?
24. Что называется ремонтируемым объектом?
25. Что называется неремонтируемым объектом?
26. Какое событие называется повреждением?
27. Какое событие называется отказом?
28. Какой отказ называется ресурсным?
29. Какой отказ называется независимым?
30. Какой отказ называется зависимым?
31. Какой отказ называется сбоем?
32. Какие отказы называются перемежающимися?
33. Какими бывают отказы по своему характеру развития и проявления?
34. Какой отказ называется внезапным?
35. Какой отказ называется постепенным?
36. Какими бывают отказы по возможности дальнейшего использования изделия?

37. Какими бывают отказы по времени возникновения?
38. Какими бывают отказы по возможности их обнаружения?
39. Какой отказ называется явным?
40. Какой отказ называется скрытым?
41. Что называется дефектом?
42. Какими бывают отказы по причинам их возникновения?
43. Какие причины отказов называются: а) случайными; б) систематическими?
44. Что называется безотказностью?
45. Что называется долговечностью?
46. Что называется ремонтпригодностью?
47. Что называется сохраняемостью?
48. По каким формулам определяются вероятность отказа и вероятность безотказной работы системы типа « $m$  из  $n$ »?
49. В каких случаях случайная величина распределяется по нормальному закону?
50. В какой период жизни изделия для расчета показателей его надежности используется нормальный закон распределения случайной величины?
51. По каким формулам определяются плотность распределения и функция распределения случайной величины при ее нормальном распределении?
52. По каким формулам определяются плотность распределения и функция распределения случайной величины при ее нормированном нормальном распределении?
53. Как рассчитываются плотность распределения и функция распределения случайной величины при ее нормальном распределении с помощью таблиц для определения этих характеристик при нормированном нормальном распределении случайной величины?
54. Что называется композицией распределений?
55. Как определяются математическое ожидание и дисперсия для композиции распределений при нормальном распределении слагаемых?
56. Что называется и для чего используется логарифмически нормальный закон распределения случайной величины?
57. По каким формулам определяются плотность распределения и математическое ожидание случайной величины при ее логарифмически нормальном распределении?
58. Как рассчитываются плотность распределения и функция распределения случайной величины при ее логарифмически нормальном распределении с помощью таблиц для определения этих характеристик при нормированном нормальном распределении случайной величины?

59. В каких случаях используется экспоненциальный закон распределения случайной величины?
60. Как рассчитываются плотность распределения и функция распределения, математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайной величины при ее экспоненциальном распределении?
61. В каких случаях для описания распределения случайной величины используется закон Вейбулла?
62. По каким формулам определяются плотность распределения и функция распределения случайной величины при ее распределении по закону Вейбулла?
63. Как влияют скрытые дефекты изделий на параметр  $m$  в формулах для расчета показателей надежности, распределенных по закону Вейбулла?
64. По какой формуле вычисляется критерий  $\chi^2$  при оценке правильности выбора закона распределения случайной величины по критерию Пирсона?
65. По какому алгоритму осуществляется оценка правильности выбора закона распределения с использованием критерия  $\chi^2$ ?
66. По какой формуле определяется функция правдоподобия выборки?
67. Из какой формулы находится оценка параметра распределения методом максимального правдоподобия для распределений с одним неизвестным параметром?
68. Для чего используют показатели надежности?
69. Перечислите и охарактеризуйте показатели надежности, различающиеся по способу их получения.
70. Перечислите и охарактеризуйте показатели надежности, различающиеся областью их использования.
71. Перечислите и охарактеризуйте показатели надежности, различающиеся областью их распространения.
72. Что называется наработкой?
73. По какой формуле определяется интенсивность отказов?
74. Что называется средней наработкой до отказа?
75. Что называется средней наработкой на отказ?
76. Что называется техническим ресурсом?
77. Что называется гамма-процентным ресурсом?
78. Что называется назначенным ресурсом?
79. Что называется установленным ресурсом?
80. Что называется сроком службы?
81. Что называется гарантийной наработкой и сроком гарантии?
82. Что называется сроком сохраняемости?
83. Что называется временем восстановления?
84. Что называется вероятностью восстановления  $P_B(t_B)$ ?

85. Что характеризуют комплексные показатели?
86. Что называется коэффициентом готовности?
87. По какой формуле определяется коэффициент технического использования  $K_{т.и}$ ?
88. По какой формуле определяется коэффициент оперативной готовности  $K_{о.г}$ ?
89. По какой формуле определяется относительная частота (частость) появления события?
90. Что в теории вероятности называется суммой  $A+B$  событий  $A$  и  $B$ ?
91. Какие события называются: а) совместными; б) несовместными?
92. По какой формуле определяется: а) вероятность суммы  $n$  событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$ ; б) вероятность суммы  $n$  несовместных событий?
93. Что называется произведением событий  $A_1$  и  $A_2$ ?
94. В каком случае событие  $A$  называют независимым от события  $B$ ?
95. Что называется условной вероятностью события?
96. По какой формуле определяется: а) вероятность произведения  $n$  событий; б) вероятность произведения  $n$  независимых событий?
97. Что называется функцией распределения или функцией вероятности случайной величины?
98. По каким формулам определяются вероятность отказа  $Q(t)$  и вероятность безотказной работы  $P(t)$  изделия в течение наработки  $t$ , если известна функция распределения  $F(t)$  его наработки до отказа?
99. Что называется плотностью распределения  $f(x)$  случайной величины  $X$ ?
100. Как называется плотность распределения в теории надежности?
101. Чему равна площадь под кривой  $f(x)$  на заданном интервале значений случайной величины?
102. Что называется статистическими оценками?
103. К чему стремится среднее значение случайной величины с увеличением числа опытов?
104. По каким формулам определяется математическое ожидание для непрерывных величин (вероятностная трактовка) и для дискретных величин (статистическая трактовка)?
105. Что называется и по каким формулам определяется дисперсия (рассеяние) случайной величины?
106. По какой формуле определяется оценка дисперсии случайной величины?
107. По какой формуле определяется среднее квадратическое отклонение  $\sigma_x$ ?
108. По какой формуле определяется коэффициент вариации?
109. Что называется квантилью, медианой, модой?



## 2. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

### 2.1. Порядок расчета надежности

Надежность объекта рассчитывают на стадиях жизненного цикла и соответствующих этим стадиям этапах видов работ, установленных программой обеспечения надежности (ПОН) объекта или документами, ее заменяющими.

ПОН должна устанавливать цели расчета на каждом этапе видов работ, применяемые при расчете нормативные документы и методики, сроки выполнения расчета и исполнителей, порядок оформления, представления и контроля результатов расчета.

Расчет надежности объекта на определенном этапе видов работ, соответствующем некоторой стадии его жизненного цикла, может иметь своими целями:

- обоснование количественных требований по надежности к объекту или его составным частям;
- проверку выполнимости установленных требований и/или оценка вероятности достижения требуемого уровня надежности объекта в установленные сроки и при выделенных ресурсах, обоснование необходимых корректировок установленных требований;
- сравнительный анализ надежности вариантов схемно-конструктивного построения объекта и обоснование выбора рационального варианта;
- определение достигнутого (ожидаемого) уровня надежности объекта и/или его составных частей, в том числе расчетное определение показателей надежности или параметров распределения характеристик надежности составных частей объекта в качестве исходных данных для расчета надежности объекта в целом;
- обоснование и проверку эффективности предлагаемых (реализованных) мер по доработкам конструкции, технологии изготовления, системы технического обслуживания и ремонта объекта, направленных на повышение его надежности;
- решение различных оптимизационных задач, в которых показатели надежности выступают в роли целевых функций, управляемых параметров или граничных условий, в том числе таких, как оптимизация структуры объекта, распределение требований по надежности между показателями отдельных составляющих надежности (например безотказности и ремонтпригодности), расчет комплектов ЗИП, оптимизация систем технического обслуживания и ремонта, обоснование гарантийных сроков и назначенных сроков службы (ресурса) объекта и др.;
- проверку соответствия ожидаемого (достигнутого) уровня надежности объекта установленным требованиям (контроль надежности), если прямое экспериментальное подтверждение их уровня надежности невозможно технически или нецелесообразно экономически.

## 2.2. Общая схема расчета

Расчет надежности объектов в общем случае представляет собой процедуру последовательного поэтапного уточнения оценок показателей надежности по мере отработки конструкции и технологии изготовления объекта, алгоритмов его функционирования, правил эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта, критериев отказов и предельных состояний, накопления более полной и достоверной информации о всех факторах, определяющих надежность, и применения более адекватных и точных методов расчета и расчетных моделей.

Расчет надежности на любом этапе видов работ, предусмотренном планом ПОН, включает:

- идентификацию объекта, подлежащего расчету;
- определение целей и задач расчета на данном этапе, номенклатуры и требуемых значений рассчитываемых показателей надежности;
- выбор метода(ов) расчета, адекватного(ых) особенностям объекта, целям расчета, наличию необходимой информации об объекте и исходных данных для расчета;
- составление расчетных моделей для каждого показателя надежности;
- получение и предварительную обработку исходных данных для расчета, вычисление значений показателей надежности объекта и, при необходимости, их сопоставление с требуемыми;
- оформление, представление и защиту результатов расчета.

## 2.3. Идентификация объекта

Идентификация объекта для расчета его надежности включает получение и анализ следующей информации об объекте, условиях его эксплуатации и других факторах, определяющих его надежность:

- назначение, области применения и функции объекта; критерии качества функционирования, отказов и предельных состояний,
- возможные последствия отказов (достижения объектом предельного состояния) объекта;
- структура объекта, состав, взаимодействие и уровни нагруженности входящих в него элементов, возможность перестройки структуры и/или алгоритмов функционирования объекта при отказах отдельных его элементов;
- наличие, виды и способы резервирования, используемые в объекте; типовая модель эксплуатации объекта, устанавливающая перечень возможных режимов эксплуатации и выполняемых при этом функций, правила и частоту чередования режимов, продолжительность пребывания объекта в

каждом режиме и соответствующие наработки, номенклатуру и параметры нагрузок и внешних воздействий на объект в каждом режиме;

- планируемая система технического обслуживания (ТО) и ремонта объекта, характеризуемая видами, периодичностью, организационными уровнями, способами выполнения, техническим оснащением и материально-техническим обеспечением работ по его ТО и ремонту;

- распределение функций между операторами и средствами автоматического диагностирования (контроля) и управления объектом, виды и характеристики человеко-машинных интерфейсов, определяющих параметры работоспособности и надежности работы операторов;

- уровень квалификации персонала; качество программных средств, применяемых в объекте;

- планируемые технология и организация производства при изготовлении объекта.

Полнота идентификации объекта на рассматриваемом этапе расчета его надежности определяет выбор соответствующего метода расчета, обеспечивающего приемлемую на данном этапе точность при отсутствии или невозможности получения части информации.

Источниками информации для идентификации объекта служит конструкторская, технологическая, эксплуатационная и ремонтная документация на объект в целом, его составные части и комплектующие изделия в составе и комплектах, соответствующих данному этапу расчета надежности.

## 2.4. Методы расчета надежности

Методы расчета надежности подразделяют:

- по составу рассчитываемых показателей надежности (ПН);
- по основным принципам расчета.

По составу рассчитываемых показателей различают методы расчета: безотказности, ремонтпригодности, долговечности, сохраняемости, комплексных показателей надежности (методы расчета коэффициентов готовности, технического использования, сохранения эффективности и др.).

По основным принципам расчета свойств, составляющих надежность, или комплексных показателей надежности объектов различают: методы прогнозирования, структурные методы расчета, физические методы расчета.

Методы прогнозирования основаны на использовании для оценки ожидаемого уровня надежности объекта данных о достигнутых значениях и выявленных тенденциях изменения ПН объектов, аналогичных или близких к рассматриваемому по назначению, принципам действия, схемно-конструктивному построению и технологии изготовления, элементной базе

и применяемым материалам, условиям и режимам эксплуатации, принципам и методам управления надежностью (далее – объектов-аналогов).

Структурные методы расчета основаны на представлении объекта в виде логической (структурно-функциональной) схемы, описывающей зависимость состояний и переходов объекта от состояний и переходов его элементов с учетом их взаимодействия и выполняемых ими функций в объекте с последующими описаниями построенной структурной модели адекватной математической моделью и вычислением ПН объекта по известным характеристикам надежности его элементов.

Физические методы расчета основаны на применении математических моделей, описывающих физические, химические и иные процессы, приводящие к отказам объектов (к достижению объектами предельного состояния), и вычислении ПН по известным параметрам нагруженности объекта, характеристикам примененных в объекте веществ и материалов с учетом особенностей его конструкции и технологии изготовления.

Метод расчета надежности конкретного объекта выбирают в зависимости от:

- целей расчета и требований к точности определения ПН объекта;
- наличия и/или возможности получения исходной информации, необходимой для применения определенного метода расчета;
- уровня отработанности конструкции и технологии изготовления объекта, системы его ТО и ремонта, позволяющего применять соответствующие расчетные модели надежности.

При расчете надежности конкретных объектов возможно одновременное применение различных методов, например методов прогнозирования надежности электронных и электротехнических элементов с последующим использованием полученных результатов в качестве исходных данных для расчета надежности объекта в целом или его составных частей различными структурными методами.

### Структурные методы расчета надежности

Структурные методы являются основными методами расчета показателей безотказности, ремонтпригодности и комплексных ПН в процессе проектирования объектов, поддающихся разукрупнению на элементы, характеристики надежности которых в момент проведения расчетов известны или могут быть определены другими методами (прогнозирования, физическими, по статистическим данным, собранным в процессе их применения в аналогичных условиях). Эти методы используют также для расчета долговечности и сохраняемости объектов, критерии предельного состояния которых выражаются через параметры долговечности (сохраняемости) их элементов.

Расчет ПН структурными методами в общем случае включает:

- представление объекта в виде структурной схемы, описывающей логические соотношения между состояниями элементов и объекта в целом с учетом структурно-функциональных связей и взаимодействия элементов, принятой стратегии обслуживания, видов и способов резервирования и других факторов;
- описание построенной структурной схемы надежности (ССН) объекта адекватной математической моделью, позволяющей в рамках введенных предположений и допущений вычислить ПН объекта по данным о надежности его элементов в рассматриваемых условиях их применения.

В качестве структурных схем надежности могут использоваться:

- структурные блок-схемы надежности, представляющие объект в виде совокупности определенным образом соединенных (в смысле надежности) элементов (стандарт МЭК 1078);
- деревья отказов объекта, представляющие собой графическое отображение причинно-следственных связей, обуславливающих определенные виды его отказов (стандарт МЭК 1025);
- графы (диаграммы) состояний и переходов, описывающие возможные состояния объекта и его переходы из одного состояния в другое в виде совокупности состояний и переходов его элементов.

Математические модели, применяемые для описания соответствующих ССН, определяются видами и сложностью указанных структур, принятыми допущениями относительно видов законов распределения характеристик надежности элементов, точностью и достоверностью исходных данных для расчета и другими факторами.

Ниже рассмотрены наиболее употребительные математические методы расчета ПН, что не исключает возможности разработки и применения других методов, более адекватных структуре и другим особенностям объекта.

#### Методы расчета безотказности невосстанавливаемых объектов вида I

По классификации объектов в соответствии с ГОСТ 27.003–90 к изделиям вида I относятся те, которые в процессе эксплуатации могут находиться в двух состояниях – работоспособном или неработоспособном.

Как правило, для описания безотказности таких объектов применяют блок-схемы безотказности, правила составления и математического описания которых установлены МЭК 1078. В частности, указанным стандартом установлены:

- методы прямого расчета вероятности безотказной работы объекта (ВБР) по соответствующим параметрам безотказности элементов для простейших параллельно-последовательных структур;

- методы расчета ВБР для более сложных структур, относящихся к классу монотонных, включая метод прямого перебора состояний, метод минимальных путей и сечений, метод разложения относительно любого элемента.

Для расчета показателей типа средней наработки объекта до отказа в указанных методах используют метод прямого или численного интегрирования распределения наработки до отказа объекта, представляющего композицию соответствующих распределений наработок до отказа его элементов. Если информация о распределении наработок до отказа элементов неполна или недостоверна, то применяют различные граничные оценки ПН объекта, известные из теории надежности.

В частном случае невозстанавливаемой системы с различными способами резервирования и при экспоненциальном распределении наработок до отказа элементов применяют ее структурное отображение в виде графа переходов и его математическое описание с помощью марковского процесса.

При использовании для структурного описания безотказности деревьев отказов в соответствии с МЭК 1025 вероятности соответствующих отказов рассчитывают с использованием булева представления дерева отказов и метода минимальных сечений.

### Методы расчета безотказности и комплексных ПН восстанавливаемых объектов вида I

Универсальным методом расчета для объектов любой структуры и при любых сечениях распределений наработок между отказами и времен восстановления элементов при любых стратегиях и методах восстановления и профилактики служит метод статистического моделирования, в общем случае включающий:

- синтез формальной модели (алгоритма) формирования последовательности случайных событий, происходящих в процессе работы объекта (отказов, восстановлений, переключений на резерв, начала и конца технического обслуживания);
- разработку программного обеспечения для реализации на ЭВМ составленного алгоритма и расчета ПН объекта;
- проведение имитационного эксперимента на ЭВМ путем многократной реализации формальной модели, обеспечивающей требуемую точность и достоверность расчета ПН.

Метод статистического моделирования для расчета надежности применяют при отсутствии адекватных аналитических моделей из числа рассматриваемых ниже.

Для резервированных последовательных структур с восстановлением и произвольными способами резервирования элементов используют марковские модели для описания соответствующих графов (диаграмм) состояний.

В некоторых случаях для объектов с неэкспоненциальными распределениями наработок и времени восстановления немарковская задача расчета ПН может быть сведена к марковской путем введения определенным способом фиктивных состояний объекта в его граф переходов.

Другой эффективный метод расчета ПН объектов с резервом основан на представлении наработок их между отказами в виде суммы случайного числа случайных слагаемых и непосредственном вычислении ПН объектов без привлечения методов теории случайных процессов.

### Методы расчета показателей ремонтпригодности

Методы расчета показателей ремонтпригодности в общем случае основаны на представлении процесса ТО или ремонта определенного вида как совокупности отдельных задач ( операций), вероятности и цели выполнения которых определяются показателями безотказности (долговечности) объектов и принятой стратегией ТО и ремонта, а продолжительность (трудоемкость, стоимость) выполнения каждой задачи зависит от конструктивной приспособленности объекта к ТО (ремонту) данного вида.

В частности, при расчете показателей ремонтпригодности объектов при текущем неплановом ремонте распределение времени (трудоемкости, стоимости) его восстановления представляет композицию распределений затрат на отдельные задачи восстановления с учетом ожидаемой вероятности выполнения каждой задачи за некоторый период работы объекта. Указанные вероятности могут быть рассчитаны, например, с помощью деревьев отказов, а параметры распределения затрат на выполнение отдельных задач определяют одним из методов, установленных, например, МР 252-87 (нормативно-коэффициентным, по регрессионным моделям и др.).

Общая схема расчета включает:

- составление перечня возможных отказов объекта и оценку их вероятностей (интенсивностей);
- отбор из составленного перечня методом расслоенной случайной выборки некоторого достаточно представительного числа задач и расчет параметров распределений их продолжительности (трудоемкости, стоимости). В качестве таких распределений обычно используют усеченное нормальное или альфа-распределение;
- построение эмпирического распределения затрат на текущий ремонт объекта путем сложения с учетом вероятностей отказов распределений затрат на отдельные задачи и его сглаживание с помощью соответствующего

теоретического распределения (логарифмически-нормального или гамма-распределения);

- вычисление показателей ремонтпригодности объекта по параметрам выбранного закона распределения.

### Методы расчета показателей надежности объектов вида II

По классификации ГОСТ 27.003–90 к изделиям вида II относятся те, которые могут находиться в работоспособном, неработоспособном и в некотором числе частично неработоспособных состояний, в которые они переходят в результате частичного отказа.

Для объектов данного вида применяют ПН типа "коэффициент сохранения эффективности" ( $K_{эф}$ ), при расчете которого сохраняются общие принципы расчета надежности объектов вида I, но каждому состоянию объекта, определяемому совокупностью состояний его элементов, или каждой возможной его траектории в пространстве состояний элементов должно быть поставлено в соответствие определенное значение доли сохраняемой номинальной эффективности от 0 до 1 (для объектов вида I эффективность в любом состоянии может принимать только два возможных значения: 0 или 1).

Существует два основных метода расчета  $K_{эф}$ :

- метод усреднения по состояниям (аналог метода прямого перебора состояний), применяемый для объектов кратковременного действия, выполняющих задачи, продолжительность которых такова, что вероятностью изменения состояния объекта в процессе выполнения задачи можно пренебречь и учитывать только его начальное состояние;

- метод усреднения по траекториям, применяемый для объектов длительного действия, продолжительность выполнения задач которыми такова, что нельзя пренебречь вероятностью смены состояний объекта при их выполнении за счет отказов и восстановлений элементов. При этом процесс функционирования объекта описывается реализацией одной из возможных траекторий в пространстве состояний.

Известны также некоторые частные случаи расчетных схем для определения  $K_{эф}$ , применяемые для систем с определенными видами функции эффективности, например:

- системы с аддитивным показателем эффективности, каждый элемент которых вносит определенный независимый вклад в выходной эффект от применения системы;

- системы с мультипликативным показателем эффективности, получаемым как произведение соответствующих показателей эффективности подсистем;



- системы с резервированием функций; системы, выполняющие задачу несколькими возможными способами с использованием различных сочетаний элементов, участвующих в выполнении задачи каждым из них;
- симметричные ветвящиеся системы;
- системы с пересекающимися зонами действия и др.

Во всех перечисленных выше схемах  $K_{эф}$  системы представляют функцией  $K_{эф}$  ее подсистем или ПН элементов.

Наиболее принципиальным моментом в расчетах  $K_{эф}$  является оценка эффективностей системы в различных состояниях или при реализации различных траекторий в пространстве состояний, проводимая аналитически, или методом моделирования, или экспериментальным путем непосредственно на самом объекте или его натуральных моделях (макетах).

### Физические методы расчета надежности

Физические методы применяют для расчета безотказности, долговечности и сохраняемости объектов, для которых известны механизмы их деградации под влиянием различных внешних и внутренних факторов, приводящие к отказам (предельным состояниям) в процессе эксплуатации (хранения).

Методы основаны на описании соответствующих процессов деградации с помощью адекватных математических моделей, позволяющих вычислять ПН с учетом конструкции, технологии изготовления, режимов и условий работы объекта по справочным или определенным экспериментально физическим и иным свойствам веществ и материалов, используемых в объекте.

В общем случае указанные модели при одном ведущем процессе деградации могут быть представлены моделью выбросов некоторого случайного процесса за пределы границ допустимой области его существования, причем границы этой области могут быть также случайными и коррелированными с указанным процессом (моделью непревышения).

При наличии нескольких независимых процессов деградации, каждый из которых порождает свое распределение ресурса (наработки до отказа), результирующее распределение ресурса (наработки объекта до отказа) находят с использованием модели "слабейшего звена" (распределение минимума независимых случайных величин).

Компоненты моделей непревышения могут иметь различную физическую природу и, соответственно, описываться разными видами распределений случайных величин (случайных процессов), а также могут быть в моделях накопления повреждений. Этим обусловлено большое разнообразие применяемых на практике моделей непревышения, причем лишь в относительно редких случаях эти модели допускают прямое аналитическое решение. Поэтому основным методом расчета надежности по моделям непревышения является статистическое моделирование.

## Исходные данные для расчета надежности

Исходными данными для расчета надежности объекта могут быть:

- априорные данные о надежности объектов-аналогов, составных частей и комплектующих изделий рассматриваемого объекта по опыту их применения в аналогичных или близких условиях;
- оценки показателей надежности (параметры законов распределения характеристик надежности) составных частей объекта и параметров примененных в объекте материалов, полученные экспериментальным или расчетным способом непосредственно в процессе разработки (изготовления, эксплуатации) рассматриваемого объекта и его составных частей;
- расчетные и/или экспериментальные оценки параметров нагруженности примененных в объекте составных частей и элементов конструкции.

Источниками исходных данных для расчета надежности объекта могут быть:

- стандарты и технические условия на составные части объекта, используемые в нем комплектующие элементы межотраслевого применения, вещества и материалы;
- справочники по надежности элементов, свойствам веществ и материалов, нормативам продолжительности (трудоемкости, стоимости) типовых операций ТО и ремонта и другие информационные материалы;
- статистические данные (банки данных) о надежности объектов-аналогов, входящих в их состав элементов, свойствах применяемых в них веществ и материалов, о параметрах операций ТО и ремонта, собранные в процессе их разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации;
- результаты прочностных, электрических, тепловых и иных расчетов объекта и его составных частей, включая расчеты показателей надежности составных частей объекта.

При наличии нескольких источников исходных данных для расчета надежности объекта приоритеты в их использовании или методы объединения данных из разных источников должны быть установлены в методике расчета. В расчете надежности, включаемом в комплект рабочей документации на объект, предпочтительным должно быть применение исходных данных из стандартов и технических условий на составные части, элементы и материалы.

## Адекватность метода расчета

Адекватность выбранного метода расчета и построенных расчетных моделей целям и задачам расчета надежности объекта характеризуют:

- полнотой использования в расчете всей доступной информации об объекте, условиях его эксплуатации, системе ТО и ремонта, характе-

ристиках надежности составных частей, свойствах применяемых в объекте веществ и материалов;

- обоснованностью принятых при построении моделей допущений и предположений, их влиянием на точность и достоверность оценок ПН;
- степенью соответствия уровня сложности и точности расчетных моделей надежности объекта доступной точности исходных данных для расчета.

Степень адекватности моделей и методов расчета надежности оценивают путем:

- сопоставления результатов расчета и экспериментальной оценки ПН объектов-аналогов, для которых применялись аналогичные модели и методы расчета;
- исследования чувствительности моделей к возможным нарушениям принятых при их построении допущений и предположений, а также к погрешностям исходных данных для расчета;
- экспертизы и апробации применяемых моделей и методов, проводимых в установленном порядке.

### Требования к методикам расчета

Для расчета надежности объектов применяют:

- типовые методики расчета, разрабатываемые для группы (вида, типа) однородных по назначению и принципам обеспечения надежности объектов, оформляемые в виде соответствующих нормативных документов (государственных и отраслевых стандартов, стандартов предприятия и др.);
- методики расчета, разрабатываемые для конкретных объектов, особенности конструкции и/или условий применения которых не допускают применения типовых методик расчета надежности. Указанные методики, как правило, включают непосредственно в отчетные документы по расчету надежности или оформляют в виде отдельных документов, включаемых в комплект документации соответствующего этапа разработки объекта.

Типовая методика расчета надежности должна содержать:

- характеристику объектов, на которые распространяется методика, в соответствии с правилами их идентификации, приведенными в данном разделе;
- перечень рассчитываемых ПН объекта в целом и его составных частей, методы, применяемые для расчета каждого показателя;
- типовые модели для расчета ПН и правила их адаптации для расчета надежности конкретных объектов, соответствующие этим моделям алгоритмы расчета и, при наличии, программные средства;
- методы и соответствующие методики оценки параметров нагруженности составных частей объектов, учитываемых в расчетах надежности;

- требования к исходным данным для расчета надежности (источники, состав, точность, достоверность, форма представления) или непосредственно сами исходные данные, методы объединения разнородных исходных данных для расчета надежности, получаемых из разных источников; решающие правила для сопоставления расчетных значений ПН с требуемыми, если результаты расчета применяют для контроля надежности объектов;

- методы оценки погрешностей расчета ПН, вносимые принятыми для используемых моделей и методов расчета допущениями и предположениями;

- методы оценки чувствительности результатов расчета к нарушениям принятых допущений и/или к погрешностям исходных данных;

- требования к форме представления результатов расчета ПН и правила защиты результатов расчета в соответствующих контрольных точках ПОН и при экспертизах проектов объектов.

Методика расчета надежности конкретного объекта должна содержать:

- информацию об объекте, обеспечивающую его идентификацию для расчета надежности; номенклатуру рассчитываемых ПН и их требуемые значения;

- модели для расчета каждого ПН, принятые при их построении, допущения и предположения, соответствующие алгоритмы вычисления ПН и применяемые программные средства, оценки погрешностей и чувствительности выбранных (построенных) моделей;

- исходные данные для расчета и источники их получения; методики оценки параметров нагруженности объекта и его составных частей или непосредственно оценки указанных параметров со ссылками на соответствующие результаты и методики прочностных, тепловых, электрических и иных расчетов объекта.

### Представление результатов расчета

Результаты расчета надежности объекта оформляют в виде раздела пояснительной записки к соответствующему проекту (эскизному, техническому) или в виде самостоятельного документа (РР по ГОСТ 2.102, отчета и др.), содержащего:

- цели и методику (ссылку на соответствующую типовую методику) расчета; расчетные значения всех ПН и заключения об их соответствии установленным требованиям надежности объекта; выявленные недостатки конструкции объекта и рекомендации по их устранению с оценками эффективности предлагаемых мер с точки зрения их влияния на уровень надежности;

- перечень составных частей и элементов, которые лимитируют надежность объекта или по которым отсутствуют необходимые данные для расчета ПН, предложения по включению в ПОН дополнительных мероприятий по повышению (углубленному исследованию) их надежности или по их замене на более надежные (отработанные и проверенные);

- заключение о возможности перехода к следующему этапу отработки объекта при достигнутом расчетном уровне его надежности.

Содержание отчетного документа по расчету надежности должно допускать возможность независимой проверки результатов расчета при экспертизе проекта и контроле реализации ПОН.

Расчетные оценки ПН, заключения о их соответствии установленным требованиям и возможности перехода к следующему этапу видов работ по разработке (постановке на производство) объекта, рекомендации по доработкам с целью повышения его надежности включают в акт приемочных испытаний, если принято решение о контроле надежности объекта расчетным методом.

*Определение надежности* – определение численных значений показателей надежности объекта.

*Контроль надежности* – проверка соответствия объекта заданным требованиям к надежности.

*Расчетный метод определения надежности* – метод, основанный на вычислении показателей надежности по справочным данным о надежности компонентов и комплектующих элементов объекта, по данным о надежности объектов-аналогов, по данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту оценки надежности.

*Расчетно-экспериментальный метод определения надежности* – метод, при котором показатели надежности всех или некоторых составных частей объекта определяют по результатам испытаний и (или) эксплуатации, а показатели надежности объекта в целом рассчитывают по математической модели.

*Экспериментальный метод определения надежности* – метод, основанный на статистической обработке данных, получаемых при испытаниях или эксплуатации объекта в целом.

### **Статистическая оценка надежности**

Зависимость показателей надежности от многочисленных и разнообразных факторов приводит к тому, что появление отказов носит случайный характер. Случайный характер отказов технических устройств требует использовать теорию вероятностей и математическую статистику.

Если имеется информация об отказах, то методами математической статистики можно определить статистические характеристики и статистические модели, описывающие закономерности появления отказов. При

формировании статистической модели отказов каждый из них рассматривается как событие – один из возможных исходов испытания. При формировании статистической модели ресурса элемента рассматриваются только такие отказы технических устройств, которые характеризуют появление определенного признака предельного состояния данного элемента. Испытание (опыт, эксплуатация) – это практическое осуществление некоторого комплекса условий, правил. События – отказы – наступают в случайные моменты времени. Интервал времени (наработки) от начала работы до появления отказа рассматривают как случайную величину. Анализ надежности и качества функционирования объекта и его составных частей (элементов) сводится к анализу интервалов времени (наработок), в течение которых система находится в состоянии работоспособности и случайных интервалов времени, в течение которых МС простаивает (восстанавливается, ремонтируется).

Таким образом, для получения необходимой информации о надежности системы и ее элементов следует провести в соответствующем объеме испытания в условиях и режимах, по возможности близких к реальным условиям эксплуатации, и затем, используя методы математической статистики, обработать данные этих испытаний.

Определение различных оценок показателей надежности по результатам ресурсных или других видов испытаний на надежность и является основной задачей статистической теории надежности.

Математическую статистику в качестве математического аппарата формирования статистической модели можно использовать только в том случае, если случайные величины обладают статистической устойчивостью.

Обычно подтверждение статистической устойчивости определяют тем, что при увеличении числа испытаний  $N$  относительная частота (частость) наступления события  $A$  становится близкой к некоторому числу  $P(A)$ , называемому вероятностью события  $A$ , т.е.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{m_A}{N} = P(A),$$

где  $m_A$  – число наступления события  $A$  при  $N$  повторениях некоторого испытания.

Но в такой форме проверке статистической устойчивости экспериментально осуществить нельзя, так как при проведении эксперимента нельзя увеличивать число испытаний  $N$  до бесконечности. Поэтому одна из возможных проверок статистической устойчивости состоит в том, что сопоставляют относительную частоту события  $A$ , вычисленную по части испытаний, с частотой события  $A$ , определенной по всей совокупности испытаний.

Если статистическая устойчивость не подтверждается, то это может быть по двум причинам: 1) качество продукции колеблется при производ-

стве из-за колебания качества сырья и технологических нарушений; 2) не соблюдается одинаковость условий испытаний для всех испытываемых объектов.

Существуют различные статистические методы отсева единичных, резко выделяющихся наблюдений в выборке и методы анализа однородности различных выборок, полученных при меняющихся условиях. Анализ однородности проводится с целью установления возможности объединения различных выборок в одну общую выборку для дальнейшей обработки.

Качество статистической информации определяется ее необходимым объемом и достоверностью.

В математической статистике рассматривают результат эксперимента (испытаний) как некоторую совокупность, содержащую для случайной величины  $X$  некоторое число  $n$  реализаций (выборочных значений) этой случайной величины  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Эту совокупность называют выборкой (выборочной совокупностью) объема  $n$  из генеральной совокупности.

*Генеральной совокупностью* называют совокупность однородных объектов, которую изучают выборочным методом, т.е. суждение о генеральной совокупности основано на изучении выборки.

Применительно к исследованию надежности реализациями могут быть либо значения наработок между отказами (до отказа), либо значения времени восстановления.

Например, выпущена партия в 1000 шт. коленчатых валов. На ресурсные испытания выделено 10 валов. При испытаниях получены наработки до разрушения шейки вала – 8000, 8900, 9150, 9150, 9150, 9670, 9680, 9690, 9700, 9700 ч. В этом случае генеральная совокупность  $N=1000$ ; объем выборки  $n=10$ ; реализации (выборочные значения)  $x_1=8000$  ч,  $x_2=8900$  ч,  $x_3=9150$  ч, ...,  $x_{10}=9700$  ч.

Объем статистической информации – это величина, пропорциональная наработке наблюдаемых образцов и количеству реализаций (ресурсов, отказов), которыми располагают для математической обработки. Возможности увеличения объема статистической информации часто весьма ограничены. Частично неполноту статистической информации можно компенсировать последовательным накоплением информации о надежности изделия, начиная с этапов его проектирования.

Достоверность статистической информации (т.е. уровень достоверной вероятности полученных значений) определяется требованиями математической статистики к исходному статистическому материалу. В частности, каждая из реализаций выборки должна быть случайной и принадлежать исследуемой генеральной совокупности. Такую выборку называют представительной (репрезентативной). В этом случае по выборке можно сделать обоснованное суждение о генеральной совокупности. Представительность выборки при контроле качества (надежности) обеспечи-

вается случайным отбором, при котором вероятность попасть в выборку для всех объектов одинакова.

Низкая достоверность статистической информации может обуславливаться несовершенством системы сбора, анализа и обработки информации.

Первичная обработка экспериментального материала состоит в упорядочении выборочных значений и при необходимости в группировке выборочных наблюдений по достаточно малым интервалам, в вычислении частот (относительных частот) для каждого интервала наработки, в определении числовых характеристик статистического распределения и графическом представлении результатов в виде гистограмм, полигонов и эмпирических функций распределения.

Упорядочение выборочных наблюдений состоит в расположении наблюдавшихся значений (ресурсов, наработок до первого отказа, времени восстановления и т.д.) в следующем порядке:  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ . Полученный ряд называют вариационным, или ранжированным, а различные значения  $x_i$  – вариантами. Одна и та же варианта в ранжированном ряду может встречаться несколько раз.

Если число членов вариационного ряда велико (обычно, если  $n \geq 100$ ), то для удобства его изучения группируют наблюдавшиеся значения по интервалам, образуя интервальный ряд. Длину интервала обычно берут одинаковой, хотя это и необязательно.

Интервальный ряд может быть построен как для дискретных, так и для непрерывных случайных величин. Число интервалов  $r$  определяют, используя правило Старджесса для выборки объема  $n$ :  $r = 1 + 3,3 \lg n$ . Тогда

длина интервала  $h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{r}$ , где  $x_{\max}$  и  $x_{\min}$  – соответственно максимальная и минимальная варианты.

Число наблюдений с одинаковым значением варианты называют частотой, т.е. если значение  $x_1$  наблюдалось  $m_1$  раз,  $x_2$  наблюдалось  $m_2$  раз, ...,  $x_k - m_k$  раз, то  $m_1, m_2, \dots, m_k$  – частоты. Для интервального ряда частота  $i$ -го интервала равна числу значений  $m_i$ , наблюдавшихся в  $i$ -м интервале.

Сумма частот равна объему выборки  $\sum_{i=1}^k m_i = \sum_{j=1}^r m_j = n$ , где  $k$  – число

вариант;  $r$  – число интервалов;  $n$  – объем выборки.

Отношение частоты к объему выборки называют частотью (относительной частотой)  $\hat{p}_i = m_i/n$ .

Варианты (перечень интервалов для интервального ряда) и соответствующие им частоты (частости) образуют статистический ряд выборки.

После такой подготовки можно получить различные статистические характеристики (статистики).



Среднее арифметическое (выборочное среднее, статистическое среднее, средневзвешенное)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{\sum_{j=1}^r x_j \cdot m_j}{n} = \sum_{j=1}^r x_j p_j.$$

Выборочная дисперсия (статистическая дисперсия)

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^r (x_j - \bar{x})^2 m_j \text{ для } n > 20;$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^r (x_j - \bar{x})^2 m_j \text{ для } n \leq 20,$$

где  $x_j$  – срединное значение  $j$ -го интервала.

Статистическое среднее и статистическая дисперсия являются важнейшими числовыми характеристиками статистического распределения, так как они определяют основные особенности анализируемого статистического ряда – центр группирования и степень рассеяния наблюдений относительно центра.

Чтобы мера изменчивости была выражена в тех же единицах измерения, что и сама случайная величина, для характеристики рассеяния принимают также выборочное среднее квадратическое отклонение (выборочное стандартное отклонение, выборочный стандарт)

$$s = \sqrt{s^2}.$$

Используют также такие характеристики: мода – значение случайной величины (наработки), имеющее наибольшую вероятность (значение признака, встречающееся с наибольшей частотой); медиана – значение  $x_{0,5}$  случайной величины, при котором вероятность появления значений, меньших  $x_{0,5}$ , равна вероятности появления величин, больших  $x_{0,5}$ .

Для медианы можно дать и другое определение. Медианой называют квантиль, отвечающую вероятности  $P=0,5$ .

Квантилью  $x_p$ , отвечающей вероятности  $P$ , называют то значение, при котором функция распределения  $F(x)$  равна  $P$ , т.е.  $F(x_p) = P(x < x_p) = P$ .

Кроме среднего арифметического  $\bar{x}$  (статистического начального момента первого порядка) и выборочной дисперсии (статистического центрального момента второго порядка) используют как статистическую характеристику статистический центральный момент третьего порядка

$$\mu_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3.$$

Третий центральный момент характеризует отклонение кривой распределения от симметричной. Для симметричного распределения (например, нормального)  $\mu_3 = 0$ . Кривая распределения с одной вершиной при  $\mu_3 < 0$  имеет левостороннюю (отрицательную) асимметрию 1 (рис. 2.1), а при  $\mu_3 > 0$  – правостороннюю (положительную) асимметрию 2 (рис. 2.1). Асимметрия определяется как  $A_x = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$ .

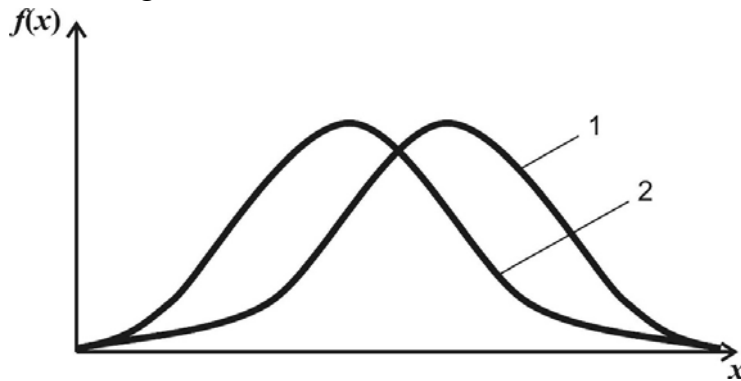


Рис. 2.1. Асимметрия распределения

Статистический центральный момент четвертого порядка  $\mu_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4$  характеризует островершинность (эксцесс) эмпирического распределения. Для нормального распределения отношение  $\frac{\mu_4}{\sigma^4} = 3$ , и в качестве характеристики островершинности принята величина  $E_x = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3$ , которую называют эксцессом. При  $E_x < 0$  кривая более пологая, чем при нормальном распределении (менее островершинная). При  $E_x > 0$  кривая распределения более островершинная, чем при нормальном распределении.

Более полными характеристиками выборки по сравнению с рассмотренными выше являются эмпирическая функция распределения, гистограмма и полигон.

Эмпирическая функция распределения (статистическая функция распределения, кумулятивная кривая, функция накопленных частот) является статистическим аналогом функции распределения генеральной совокупности (теоритической функции распределения).

Эмпирическая функция распределения определяет для каждого  $x_i$  частоту (статистическую вероятность) события, заключающегося в том, что исследуемая случайная величина  $X$  примет значение, меньшее  $x_i$ :

$\hat{F}_n(x_i) = \hat{P}(X \leq x_i)$ . Статистическая вероятность  $\hat{F}_n(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{z < i} m_z$ , где  $n$  – об-

щее число наблюдений;  $\sum_{z < i} m_z$  – накопленная частота, т.е. число вариант со значением, меньшим  $x_i$ .

Для интервального вариационного ряда эмпирическая функция распределения имеет вид ступенчатой кривой (рис. 2.2). Ширина каждой ступеньки соответствует длине интервала, а ее высота – значению накопленной частоты.

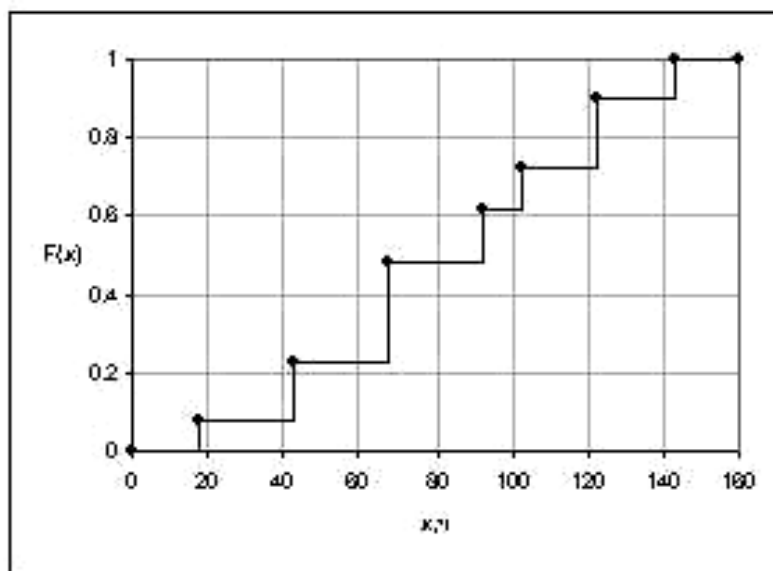


Рис. 2.2. Эмпирическая функция распределения

Гистограмма является графическим представлением интервального статистического ряда. Ее строят по следующему правилу:

- размах вариационного ряда (разность между крайними членами вариационного ряда) разбивают на ряд интервалов;

- над каждым интервалом строят прямоугольник высотой  $f(x_i) = \frac{m_i}{nh_i}$ ,

где  $m_i$  – число членов выборки, попавших в данный интервал;  $h_i$  – длина интервала.

Вид гистограммы представлен на рис. 2.3. Построенную таким образом гистограмму называют гистограммой относительных частот. Площадь гистограммы относительных частот равна сумме всех относительных частот, т.е. единице. Иногда строят полигон, соединяя отрезками середины верхних сторон прямоугольников гистограммы (кривая 2 на рис. 2.3).

Если при построении гистограммы над каждым интервалом строят прямоугольник высотой  $m_i/h_i$ , то такую гистограмму называют гистограммой частот. Площадь гистограммы частот равна сумме всех частот, т.е. объему выборки  $n$ .

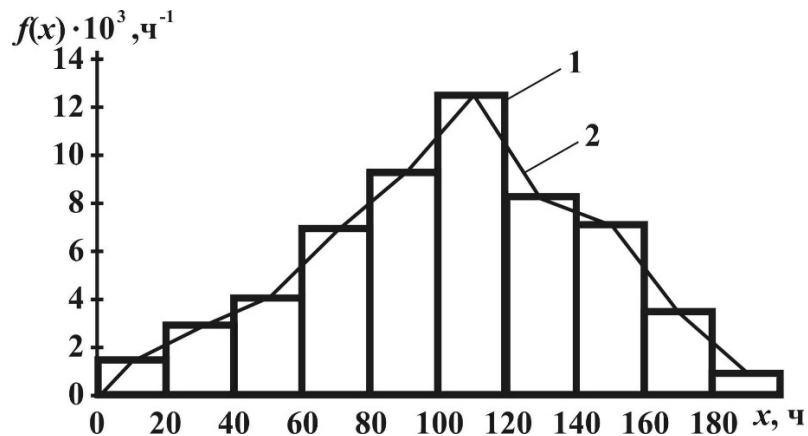


Рис. 2.3. Гистограмма (кривая 1) и полигон (кривая 2) относительных частот интервального ряда

Если выборка (число изделий, подвергающихся испытанию) растёт, то можно от статистических закономерностей перейти к вероятностным, так как при этом эмпирическая функция распределения приближается к теоретической функции распределения генеральной совокупности, среднее арифметическое (выборочное среднее) приближается к математическому ожиданию (которое является генеральной средней), а выборочная дисперсия – к дисперсии генеральной совокупности, т.е.  $\hat{F}_n(x) \rightarrow F(x)$ :

$$\bar{x} \rightarrow M(x) = \int_0^{\infty} xf(x)dx; \quad s^2 \rightarrow \sigma^2 = D(x) = \int_0^{\infty} [x - M(x)]^2 f(x)dx,$$

где  $F(x)$ ,  $M(x)$ ,  $D(x)$  – соответственно функция генеральной совокупности, математическое ожидание и дисперсия.

## 2.5. Расчет надежности систем

Расчеты показателей безотказности системы обычно производятся в предположении, что как вся система, так и любой ее элемент может находиться только в одном из двух возможных состояний – работоспособном или неработоспособном – и отказы элементов независимы друг от друга. Состояние системы (работоспособное или неработоспособное) определяется состоянием элементов и их сочетанием. Поэтому теоретически можно расчет безотказности любой системы свести к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы. Такой метод – метод прямого перебора – практически универсален и может использоваться при расчете любых систем. Однако при большом количестве элементов системы  $n$  такой путь становится нереальным

из-за большого объема вычислений (например, при  $n=10$  число возможных состояний системы составляет:  $2^n=1024$ , при  $n=20$  превышает  $10^6$ , при  $n=30$  – более  $10^9$ ). Поэтому на практике используют более эффективные и экономичные методы расчета, не связанные с большим объемом вычислений. Возможность применения таких методов связана со структурой системы.

### Классификация систем по способу обеспечения отказоустойчивости

Способность систем сохранять свою работоспособность при отказе одного или нескольких элементов называется *отказоустойчивостью* (*толерантностью*). По способу обеспечения отказоустойчивости все системы делятся на системы типа « $t$  из  $n$ », мостиковые и комбинированные.

*Система типа “ $t$  из  $n$ ”* сохраняет свою работоспособность, если из  $n$  ее элементов работоспособными окажутся любые  $t$  и более элементов. Вариантами систем типа “ $t$  из  $n$ ” являются последовательные и параллельные системы.

*Последовательная система* – это система типа “ $n$  из  $n$ ”. Отказ любого элемента этой системы приводит к отказу всей системы. Поэтому последовательная система не является отказоустойчивой. Примером последовательной системы служат: последовательно соединенные электрические лампы; система подшипников.

*Параллельная система* – это система типа “ $1$  из  $n$ ”. Отказ параллельной системы наступает при отказе всех ее элементов. Примером параллельной системы служат: параллельно соединенные электрические лампы; резервированные системы.

*Мостиковая система* получается из параллельно соединенных друг с другом последовательных цепочек элементов посредством присоединения диагональных элементов между узлами различных параллельных ветвей. Работоспособность такой системы нарушается при возникновении определенной комбинации отказов ее элементов.

*Комбинированная система* – это система, состоящая из подсистем типа « $t$  из  $n$ » и мостиковых подсистем. Для отказа такой системы необходимо возникновение определенной комбинации отказов. Примеры: смешанно соединенные электрические лампы; частично резервированные системы.

### Расчет надежности последовательных систем

В последовательных системах для безотказной работы в течение некоторой наработки  $t$  необходимо и достаточно, чтобы каждый из ее  $n$  элементов работал безотказно в течение этой наработки. Считая отказы элементов независимыми, вероятность одновременной безотказной работы  $n$  элементов определяют по теореме умножения вероятностей: вероятность

совместного появления независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P_S(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - Q_i(t)), \quad (2.1)$$

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

$Q_i(t)$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента системы.

Вероятность отказа такой системы

$$Q_S = 1 - P_S = 1 - \prod_{i=1}^n P_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i). \quad (2.2)$$

Здесь и далее обозначение наработки (аргумента  $t$ ) опускается для сокращения записей формул.

Если система состоит из равнонадёжных элементов ( $P_1 = P_2 = \dots = P_n$ ), то

$$P_S = P_1^n, \quad Q_S = 1 - (1 - Q_1)^n. \quad (2.3)$$

Из формул (2.1)–(2.3) очевидно, что при равной надёжности элементов надёжность последовательной системы оказывается тем более низкой, чем больше число элементов. Кроме того, поскольку все сомножители в правой части выражения (2.1) не превышают единицы, вероятность безотказной работы системы при последовательном соединении не может быть выше вероятности безотказной работы самого ненадежного из ее элементов (принцип “хуже худшего”) и из малонадежных элементов нельзя создать высоконадёжной системы с последовательным соединением.

Если все элементы системы работают в период нормальной эксплуатации и имеет место простейший поток отказов, то наработки элементов системы подчиняются экспоненциальному распределению и на основании (2.1) можно записать

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\Lambda t), \quad (2.4)$$

где 
$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const} \quad (2.5)$$

есть интенсивность отказов системы в целом.

Таким образом, интенсивность отказов системы при последовательном соединении элементов и простейшем потоке отказов равна сумме интенсивностей отказов элементов. С помощью выражений (2.7) и (2.8) могут быть определены средняя и  $\gamma$ -процентная наработки.

Из (2.4) – (2.5) следует, что для системы из  $n$  равнонадёжных элементов ( $\lambda_i = \lambda$ )

$$\Lambda = n\lambda, \quad T_0 = \frac{T_{0i}}{n}, \quad (2.6)$$

т.е. интенсивность отказов в  $n$  раз больше, а средняя наработка в  $n$  раз меньше, чем у отдельного элемента.

## Расчет надежности параллельных систем

Для отказа параллельной системы в течение наработки  $t$  необходимо и достаточно, чтобы все ее элементы отказали в течение этой наработки. Так что отказ системы заключается в совместном отказе всех элементов, вероятность чего (при допущении независимости отказов) может быть найдена по теореме умножения вероятностей как произведение вероятностей отказа элементов:

$$Q = Q_1 Q_2 \dots Q_n = \prod_{i=1}^n Q_i = \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (2.7)$$

Соответственно, вероятность безотказной работы

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (2.8)$$

Для систем из равнонадежных элементов ( $P_1 = P_2 = \dots = P_n$ ):

$$Q = Q_1^n, \quad P = 1 - (1 - P_1)^n, \quad (2.9)$$

т.е. надежность системы с параллельным соединением повышается при увеличении числа элементов.

Поскольку  $Q_i < 1$ , произведение в правой части (2.7) всегда меньше любого из сомножителей, т.е. вероятность отказа системы не может быть выше вероятности самого надежного ее элемента (“лучше лучшего”) и даже из сравнительно ненадежных элементов возможно построение вполне надежной системы.

## Расчет надежности систем типа “ $m$ из $n$ ”

Расчет надежности системы “ $m$  из  $n$ ” может производиться *комбинаторным методом*, в основе которого лежит формула биномиального распределения. При биномиальном распределении вероятность того, что ровно  $m$  элементов системы из общего числа  $n$  элементов окажутся работоспособными, равна:

$$P_{m \text{ из } n} = C_n^m P^m (1 - P)^{n-m}, \quad (2.10)$$

где  $P$  – вероятность безотказной работы одного элемента системы;

$C_n^m$  – биномиальный коэффициент, равный числу сочетаний по  $m$  из  $n$ :

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}. \quad (2.11)$$

Поскольку для отказа системы “ $m$  из  $n$ ” достаточно, чтобы количество исправных элементов было меньше  $m$ , вероятность отказа может быть найдена по теореме сложения вероятностей:

$$Q_S = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k P^k (1 - P)^{n-k}. \quad (2.12)$$

Аналогичным образом можно определить вероятность безотказной работы как сумму:

$$P_S = \sum_{k=m}^n C_n^k P^k (1-P)^{n-k}. \quad (2.13)$$

Очевидно, что  $Q+P=1$ , поэтому при расчетах из формул (2.12) и (2.13) следует выбирать ту, которая в данном конкретном случае содержит меньшее число слагаемых.

Для системы “2 из 5” (см. рис. 1.9) по формуле (2.13) получим:

$$\begin{aligned} P_S &= C_5^2 P_1^2 (1-P_1)^3 + C_5^3 P_1^3 (1-P_1)^2 + C_5^4 P_1^4 (1-P_1) + C_5^5 P_1^5 = \\ &= 10P_1^2 (1-P_1)^3 + 10P_1^3 (1-P_1)^2 + 5P_1^4 (1-P_1) + P_1^5 = \\ &= 10P_1^2 - 20P_1^3 + 15P_1^4 - 4P_1^5. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Вероятность отказа той же системы по (2.12):

$$\begin{aligned} Q_S &= C_5^0 (1-P_1)^5 + C_5^1 P_1 (1-P_1)^4 = (1-P_1)^5 + 5P_1 (1-P_1)^4 = \\ &= 1 - 10P_1^2 + 20P_1^3 - 15P_1^4 + 4P_1^5, \end{aligned} \quad (2.15)$$

что, как видно, дает тот же результат для вероятности безотказной работы.

### Расчет надежности мостиковых систем

Для анализа надежности систем, структурные блок-схемы которых не сводятся к параллельному или последовательному типу, можно воспользоваться *методом логических схем с применением алгебры логики* (булевой алгебры). Применение этого метода сводится к составлению для системы формулы алгебры логики, которая определяет условие работоспособности системы. При этом для каждого элемента и системы в целом рассматриваются два противоположных события – отказ и сохранение работоспособности.

Для составления логической схемы можно воспользоваться двумя методами – методом минимальных путей и методом минимальных сечений.

Рассмотрим *метод минимальных путей* для расчета вероятности безотказной работы на примере мостиковой схемы (см. рис. 1.10).

*Минимальным путем* называется набор элементов системы, отказ любого из которых может привести к отказу системы.

Минимальных путей в системе может быть один или несколько. Очевидно, система с последовательным соединением элементов (см. рис. 1.7) имеет только один минимальный путь, включающий все элементы. В системе с параллельным соединением (см. рис. 1.8) число минимальных путей совпадает с числом элементов и каждый путь включает один из них. Для мостиковой системы из пяти элементов (см. рис. 1.10) минимальных путей четыре: наборы (1 и 4), (2 и 5), (1, 3 и 5), (2, 3 и 5).



Логическая схема системы методом минимальных путей составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального пути были соединены друг с другом последовательно, а все минимальные пути параллельно (рис. 2.4).

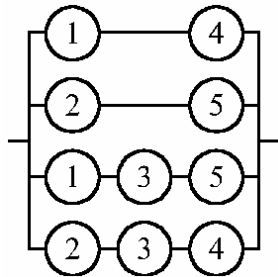


Рис. 2.4. Логическая схема мостиковой системы, построенная по методу минимальных путей

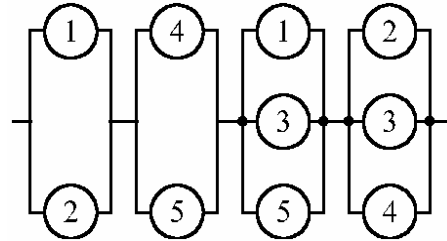


Рис. 2.5. Логическая схема мостиковой системы, построенная по методу минимальных сечений

Затем для логической схемы составляется функция алгебры логики  $A$  по общим правилам расчета вероятности безотказной работы, но вместо символов вероятностей безотказной работы элементов  $P_i$  и системы  $P$  используются символы события (сохранения работоспособности элементов  $a_i$  и системы  $A$ ). Так, “отказ” логической схемы, представленной на рис. 2.4, состоит в одновременном отказе всех четырех параллельных ветвей, а “безотказная работа” каждой ветви – в одновременной безотказной работе ее элементов. Последовательное соединение элементов логической схемы соответствует логическому умножению (“И”), параллельное – логическому сложению (“ИЛИ”). Следовательно, схема на рис. 2.4 соответствует утверждению: система работоспособна, если работоспособны элементы (1 и 4), или (2 и 5), или (1, 3 и 5), или (2, 3 и 4). Функция алгебры логики запишется:

$$A = 1 - (1 - a_1 a_4)(1 - a_2 a_5)(1 - a_1 a_3 a_5)(1 - a_2 a_3 a_4). \quad (2.16)$$

В выражении (2.16) переменные  $a$  являются булевыми, т.е. принимающими только два значения: 0 или 1. При возведении в любую степень  $k$  булева переменная  $a$  сохраняет свое значение:  $a_i^k = a_i$ . На основе этого свойства функция алгебры логики (2.16) может быть преобразована к виду

$$A = a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_5 - 2 a_1 a_2 a_4 a_5 - a_2 a_3 a_4 a_5 + 2 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5. \quad (2.17)$$

Заменив в выражении (2.17) символы событий  $a_i$  их вероятностями  $P_i$ , получим уравнение для определения вероятности безотказной работы системы:

$$P_S = P_1 P_4 + P_2 P_5 + P_1 P_3 P_5 + P_2 P_3 P_4 - P_1 P_2 P_3 P_4 - P_1 P_2 P_3 P_5 - 2 P_1 P_2 P_4 P_5 - P_2 P_3 P_4 P_5 + 2 P_1 P_2 P_3 P_4 P_5. \quad (2.18)$$

Метод минимальных путей не всегда дает точное значение вероятности безотказной работы. Для сложных систем результат расчета является нижней границей вероятности безотказной работы.

Для расчета верхней границы вероятности безотказной работы системы служит *метод минимальных сечений*.

*Минимальным сечением* называется набор элементов, отказ которых приводит к отказу системы. Как и минимальных путей, минимальных сечений может быть несколько. Очевидно, система с параллельным соединением элементов имеет только одно минимальное сечение, включающее все ее элементы. В последовательной системе число минимальных путей совпадает с числом элементов и каждое сечение включает один из них.

В мостиковой системе (см. рис. 1.10) минимальных сечений четыре: наборы элементов (1 и 2), (4 и 5), (1, 3 и 5), (2, 3 и 4). Логическая схема системы методом минимальных сечений составляется таким образом, чтобы все элементы каждого минимального сечения были соединены друг с другом параллельно, а все минимальные сечения – последовательно (см. рис. 2.5).

Функция алгебры логики по данному методу составляется так же, как и по методу минимальных путей. “Безотказная работа” логической схемы, представленной на рис. 2.5, заключается в “безотказной работе” всех последовательных участков, а “отказ” каждого из них – в одновременном “отказе” всех параллельно включенных элементов. Схема на рис. 2.5 соответствует формулировке: система откажет, если откажут элементы (1 и 2), или (4 и 5), или (1, 3 и 5), или (2, 3 и 4). Функция алгебры логики является следующей:

$$A = [1 - (1 - a_1)(1 - a_2)][1 - (1 - a_4)(1 - a_5)][1 - (1 - a_1)(1 - a_3)(1 - a_5)] \times [1 - (1 - a_2)(1 - a_3)(1 - a_4)]. \quad (2.19)$$

После преобразований с использованием свойств булевых переменных (2.19) приобретает форму (2.17), после замены событий их вероятностями переходит в выражение (2.18).

Для мостиковой системы из пяти элементов верхняя и нижняя границы вероятности безотказной работы, полученные методами минимальных сечений и минимальных путей, равны и совпадают с точными значениями вероятности безотказной работы. Для сложных систем этого может не произойти. Поэтому методы минимальных путей и минимальных сечений следует применять совместно.

В ряде случаев при анализе надежности системы удастся воспользоваться известной в математической логике *теоремой о разложении функции логики по любому аргументу*. Согласно ей, можно записать:

$$P_S = P_i P_S(P_i=1) + Q_i P_S(P_i=0), \quad (2.20)$$

где  $P_i$  и  $Q_i = 1 - P_i$  – вероятности безотказной работы и отказа  $i$ -го, особого, элемента;

$P_S(P_i=1)$  и  $P_S(P_i=0)$  – вероятности работоспособного состояния системы при условии, что особый ( $i$ -й) элемент абсолютно надежен и что особый элемент отказал соответственно.

Для мостиковой схемы (см. рис. 1.10) в качестве особого элемента целесообразно выбрать диагональный элемент 3. При  $P_3=1$  мостиковая схема превращается в параллельно-последовательное соединение (рис. 2.6, а), а при  $P_3=0$  – в последовательно-параллельное (рис. 2.6, б).

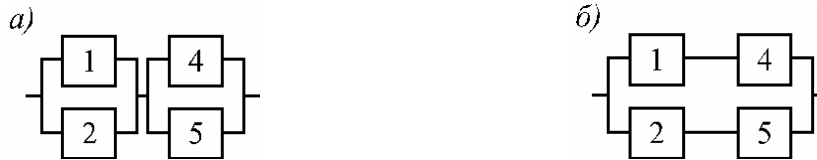


Рис. 2.6. Преобразование мостиковой схемы на рис. 1.10 при абсолютно надежном (а) и отказавшем (б) центральном элементе 3

Для преобразованных схем можно записать:

$$P_S(P_3=1)=[1-(1-P_1)(1-P_2)][1-(1-P_4)(1-P_5)]; \quad (2.21)$$

$$P_S(P_3=0)=1-(1-P_1 P_4)(1-P_2 P_5) \quad (2.22)$$

Тогда на основании формулы (2.20) получим:

$$P_S=P_3[1-(1-P_1)(1-P_2)][1-(1-P_4)(1-P_5)]+(1-P_3) \times [1-(1-P_1 P_4)(1-P_2 P_5)]. \quad (2.23)$$

Легко убедиться, что для равнонадёжных элементов формула (2.23) обращается в (2.18).

Этим методом можно воспользоваться и при разложении относительно нескольких “особых” элементов. Например, при разложении относительно двух “особых” элементов  $i$  и  $j$  вероятность безотказной работы определяется по формуле

$$P_S=P_i P_j P_S(P_i=1, P_j=1)+P_i Q_j P_S(P_i=1, P_j=0)+Q_i P_j P_S(P_i=0, P_j=1)+Q_i Q_j P_S(P_i=0, P_j=0). \quad (2.24)$$

### Расчет надежности комбинированных систем

Для расчета надежности комбинированных систем целесообразно предварительно произвести декомпозицию системы, разбив ее на простые подсистемы – группы элементов, методика расчета надежности которых известна. Затем эти подсистемы в структурной схеме надежности заменяются элементами (квазиэлементами) с вероятностями безотказной работы, равными вычисленным вероятностям безотказной работы этих подсистем. При необходимости такую процедуру можно выполнить несколько

раз, до тех пор, пока не получится структура, методика расчета надежности которой известна.

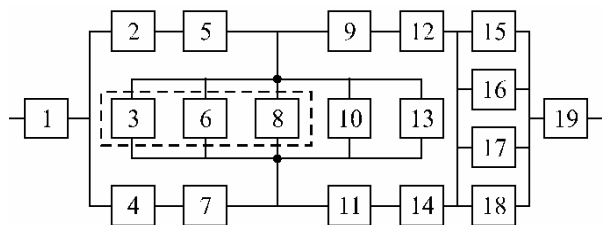


Рис. 2.7. Исходная система

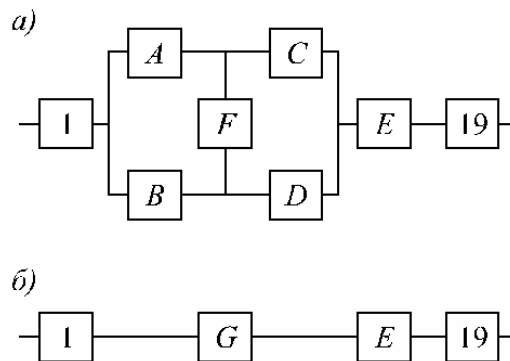


Рис. 2.8. Преобразованные системы

В качестве примера рассмотрим комбинированную систему, представленную на рис. 2.7. Здесь элементы (2 и 5), (4 и 7), (9 и 12), (11 и 14) попарно образуют друг с другом последовательные соединения. Заменяем их соответственно элементами  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , для которых расчет надежности выполняется по приведенным выше формулам. Элементы 15, 16, 17 и 18 образуют параллельное соединение, а элементы 3, 6, 8, 10 и 13 – систему “3 из 5”. Соответствующие элементы обозначим  $E$  и  $F$ . В результате преобразованная схема примет вид, показанный на рис. 2.8, а. В ней, в свою очередь, элементы  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $F$  образуют мостиковую схему, которую заменяем элементом  $G$ . После таких преобразований получается последовательная система, состоящая из элементов 1,  $G$ ,  $E$ , 19 (рис.2.8, б).

### Контрольные вопросы

1. Что должна устанавливать программа обеспечения надежности?
2. Для каких основных целей выполняется расчет надежности объекта?
3. Что в себя включает расчет надежности?
4. Что в себя включает идентификация объекта для расчета его надежности?
5. Какие источники используются при получении информации для идентификации объекта?
6. По каким признакам классифицируют методы расчета надежности?
7. Какие методы расчета различают по составу рассчитываемых показателей?
8. Какие методы расчета различают по основным принципам расчета свойств, составляющих надежность, или комплексных показателей надежности объектов?

9. На чем основаны методы прогнозирования уровня надежности объекта?
10. На чем основаны структурные методы расчета надежности?
11. На чем основаны физические методы расчета надежности?
12. Для каких объектов структурные методы являются основными методами расчета показателей надежности?
13. Что применяется в качестве структурных схем надежности?
14. Какие структурные схемы надежности обычно применяют для описания безотказности невосстанавливаемых объектов вида I?
15. В каком случае для невосстанавливаемой системы применяют ее структурное отображение в виде графа переходов и его математическое описание с помощью марковского процесса?
16. Для расчета надежности каких объектов служит метод статистического моделирования?
17. Что включает в себя метод статистического моделирования?
18. Для каких структур применяют марковские модели для описания соответствующих графов (диаграмм) состояний?

### 3. ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Испытания – это экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий.

Технический контроль – проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям.

Сущность всякого контроля сводится к осуществлению двух основных этапов:

- Получение информации о фактическом состоянии некоторого объекта, о признаках и показателях его свойств. Эту информацию можно назвать первичной.
- Сопоставление первичной информации с заранее установленными требованиями, нормами, критериями, т.е. обнаружение соответствия или несоответствия фактических данных требуемым (ожидаемым). Информацию о рассогласовании (расхождении) фактических и требуемых данных можно называть вторичной.

Экспериментальное определение характеристик свойств объекта при испытаниях может проводиться путем использования измерений, анализов, диагностирования, органолептических методов, путем регистрации определенных событий при испытаниях (отказы, повреждения) и т.д.

Характеристики свойств объекта при испытаниях могут оцениваться, если задачей испытаний является получение количественных или качественных оценок, а могут контролироваться, если задачей испытаний является только установление соответствия характеристик объекта заданным требованиям. В этом случае испытания сводятся к контролю. Поэтому ряд видов испытаний являются контрольными, в процессе которых решается задача контроля.

Важнейший признак любых испытаний – принятие на основе их результатов определенных решений.

Другим признаком испытаний является задание определенных условий испытаний (реальных или моделируемых), под которыми понимается совокупность воздействий на объект и режимов функционирования объекта.

К условиям испытаний относятся внешние воздействующие факторы, как естественные, так и искусственно создаваемые, а также внутренние воздействия, вызываемые функционированием объекта (например, нагрев, вызываемый трением или прохождением электрического тока), и режимы функционирования объекта, способы и место его установки, монтажа, крепления, скорость перемещения и т.п.

Нормальные условия испытаний (значения воздействующих факторов, режимы функционирования) должны быть указаны в НТД на методы

испытаний конкретных видов продукции. Так, например, устанавливаются нормальные климатические условия испытаний для различных видов других технических изделий, нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений и т.д.

В зависимости от вида продукции и программы испытаний объектом испытаний может являться единичное изделие или партия изделий, подвергаемая сплошному или выборочному контролю, отдельный образец или партия продукции, от которой берется оговоренная НТД проба.

Объектом испытаний может быть макет или модель изделия, и решение по результатам испытаний может относиться непосредственно к макету или модели. Однако если при испытании какого-либо изделия некоторые элементы его приходится для испытаний заменить моделями или отдельные характеристики изделия определять на моделях, то объектом испытаний остается само изделие, оценку характеристик которого получают на основе испытаний модели.

Методика испытаний – организационно-методический документ, обязательный к выполнению, включающий метод испытаний, средства и условия испытаний, отбор проб, алгоритмы выполнения операций по определению одной или нескольких взаимосвязанных характеристик свойств объекта, формы представления данных и оценивания точности, достоверности результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды. Методика испытаний, определяющая, по существу, технологический процесс их проведения, может быть оформлена в самостоятельном документе, или в программе испытаний, или в нормативно-техническом документе на продукцию (стандарты, технические условия). Методика испытаний должна быть аттестована.

Объем испытаний – характеристика испытаний, определяемая количеством объектов и видов испытаний, а также суммарной продолжительностью испытаний.

Программа испытаний – организационно-методический документ, устанавливающий объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний.

Воспроизводимость методов и результатов испытаний – характеристика, определяемая близостью результатов испытаний идентичных образцов одного и того же объекта по одной и той же методике в разных лабораториях, разными операторами с использованием различного оборудования.

Воспроизводимость методов и результатов испытаний, кроме методики испытаний (включающей метод, средства, алгоритм проведения и т.д.), может в значительной степени зависеть от свойств объекта испытаний. Если объектом является, например, партия изделий, подвергаемая выборочным

испытаниям, то такие испытания у поставщика и потребителя могут проводиться на идентичных образцах, выбранных из данной партии, и в этом случае неоднородность изделий может существенно, иногда решающим образом, влиять на воспроизводимость результатов испытаний.

Для контроля качества и приемки изготовленной продукции устанавливают следующие основные категории испытаний:

- приемосдаточные;
- периодические.

Для оценки эффективности и целесообразности внесения предлагаемых изменений в конструкцию выпускаемой продукции и (или) технологию ее изготовления проводят испытания по категории типовых испытаний.

Испытания на надежность включают в состав периодических испытаний, если периодичности их проведения совпадают. В противном случае испытания на надежность могут быть отнесены к категории самостоятельных испытаний.

Испытания на надежность относятся к числу важнейших составных частей работы по обеспечению и повышению надежности технических объектов. Эти испытания в зависимости от контролируемых (оцениваемых) свойств, составляющих надежность, могут состоять из испытаний на безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. В частности, ресурсные испытания относятся к испытаниям на долговечность.

Планирование испытаний и обработка их результатов осуществляются с применением методов математической статистики. Оценивание значений показателей надежности при определительных испытаниях должно проводиться с заданной точностью (т.е. при заданной относительной погрешности) и с заданной достоверностью (т.е. при заданном уровне доверительной вероятности). Аналогичные требования предъявляются к контрольным испытаниям. Ускорение (форсирование) испытаний не должно приводить к снижению точности и достоверности оценок.

Расчетные методы оценки надежности разработаны не по всем критериям и не для всех элементов систем. Поэтому надежность систем часто оценивают по результатам испытаний, которые называют *определятельными*.

Испытания классифицируются по следующим признакам:

1) по целям:

- *контрольные испытания* – испытания для контроля качества объекта;
- *исследовательские* – испытания для изучения определенных характеристик свойств объекта.

Исследовательские испытания проводятся с целью:

- определения или оценки показателей качества функционирования испытуемого объекта в определенных условиях его применения;



- выбора наилучших режимов применения объекта или наилучших характеристик свойств объекта;
- сравнения множества вариантов реализации объекта при проектировании и аттестации;
- построения математической модели функционирования объекта (оценки параметров математической модели);
- отбора существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования объекта;
- выбора вида математической модели объекта (среди заданного множества вариантов).

2) по срокам проведения:

- *нормальные* – испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации о характеристиках свойств объекта в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиях эксплуатации;
- *ускоренные* – испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о характеристиках свойств объекта в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях;

3) по методу проведения:

- разрушающие;
- неразрушающие.

*Сравнительные испытания* – испытания аналогичных по характеристикам или одинаковых объектов, проводимые в идентичных условиях для сравнения характеристик их свойств.

*Определительные испытания* – испытания, проводимые для определения значения характеристик заданными значениями точности и (или) достоверности.

*Сокращенные испытания* – испытания, проводимые по сокращенной программе.

*Предварительные испытания* – контрольные испытания опытных образцов и (или) опытных партий продукции с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

*Приемочные испытания* – контрольные испытания опытных образцов, опытных партий продукции или изделий единичного производства, проводимые соответственно с целью решения вопроса о целесообразности постановки этой продукции на производство и (или) использования по назначению. Приемочные испытания опытных образцов или партий продукции выполняются для решения вопроса о целесообразности постановки этой продукции на производство, а приемочные испытания изделий единичного производства проводятся для решения вопроса о целесообразности передачи этих изделий в эксплуатацию.

*Приемосдаточные испытания* – контрольные испытания продукции при приемочном контроле. Приемосдаточные испытания, как правило, проводятся изготовителем продукции. Если на предприятии-изготовителе имеется представитель заказчика, приемосдаточные испытания выполняются им в присутствии представителя изготовителя.

*Периодические испытания* – контрольные испытания выпускаемой продукции, проводимые в объемах и в сроки, установленные нормативно-технической документацией, с целью контроля стабильности качества продукции и возможности продолжения ее выпуска.

*Типовые испытания* – контрольные испытания выпускаемой продукции, выполняемые с целью оценки эффективности и целесообразности вносимых изменений в конструкцию, рецептуру или технологический процесс.

*Испытания на надежность* – испытания, проводимые для определения показателей надежности в заданных условиях.

*Граничные испытания* – испытания, проводимые для определения зависимостей между предельно допустимыми значениями параметров объекта и режимом эксплуатации.

По результатам испытаний невосстанавливаемых изделий определяют и контролируют, как правило, вероятность безотказной работы, а по результатам испытаний восстанавливаемых изделий – среднюю наработку на отказ и среднее время восстановления работоспособного состояния.

При серийном изготовлении изделий проводят контрольные испытания на надежность. Они предназначены для контроля соответствия серийной продукции требованиям по надежности, приведенным в технических условиях и учитывающим результаты определительных испытаний. В процессе серийного производства для обеспечения заданных показателей надежности предусматривают *приработочные испытания*, позволяющие выявить скрытые производственные дефекты.

Каждую сложную техническую систему подвергают *приемосдаточным испытаниям*. Общий объем этих испытаний составляет 2-3 % от назначенного гарантийного ресурса.

Для дополнительного контроля производственного процесса и надежности предусматривают *периодические испытания*. Объем этих испытаний составляет 10 % от назначенного гарантийного ресурса. Периодическим испытаниям подвергают одно изделие или партию изделий от годовой программы.

Завершающим этапом контроля производственного процесса являются *гарантийные испытания*, которым подвергают одно или несколько изделий, взятых от трехгодичной программы. Испытания проводят в объеме гарантийного ресурса. Нормативно-технической документацией допускается

выполнять гарантийные испытания не всего изделия, а только его отдельных механизмов и узлов.

Во многих случаях испытания на надежность необходимо осуществлять до разрушения. Поэтому испытывают не все изделия (*генеральную совокупность*), а их небольшую часть, называемую *выборкой*. В этом случае показатели надежности могут отличаться от реальных вследствие ограниченности и случайного состава выборки. Чтобы учесть это возможное различие, вводится понятие доверительной вероятности.

**Доверительной вероятностью (достоверностью)** называют вероятность того, что истинное значение оцениваемого параметра лежит в заданном интервале, называемом *доверительным*.

Доверительная вероятность обозначается символом "Вер":

$$\text{Вер}(T_n \leq T \leq T_v) = \beta.$$

Здесь  $\beta$  – значение двусторонней доверительной вероятности, т.е. вероятности попадания параметра  $T$  в интервал, ограниченный с двух сторон.

На практике основной интерес представляет односторонняя доверительная вероятность того, что параметр не меньше заданного значения (нижней границы), или односторонняя доверительная вероятность того, что параметр не больше заданного значения (верхней границы). Например, для вероятности безотказной работы односторонняя доверительная вероятность записывается так:

$$\text{Вер}(P_n \leq P) = \alpha.$$

Доверительную вероятность  $\alpha$  на стадии испытаний опытных образцов обычно принимают равной 0,7...0,8, на стадии передачи разработки в серийное производство – 0,9...0,95.

### 3.1. Научное планирование эксперимента

Под научным планированием экспериментов понимают математическое установление оптимального плана их проведения.

Основным требованием, предъявляемым к любому эксперименту, является минимизация времени и числа испытаний при сохранении требуемой достоверности результатов. Форма представления результатов должна быть удобна для последующих расчетов, как обычных, так и вероятностных. Вопрос оптимальности плана неразрывно связан с методом обработки результатов испытаний.

Резкое сокращение числа испытаний при их научном планировании достигается за счет использования известных или предполагаемых математических зависимостей, за счет использования уже полученных результа-

тов и, главное, за счет правильного одновременного варьирования изучаемых факторов. Эффективность научного планирования тем выше, чем сложнее изучаемый объект.

Используя кибернетический подход, объект исследования при научном планировании рассматривают как "черный ящик" – систему, у которой известны входные и выходные параметры, но неизвестно внутреннее устройство (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Схема эксперимента

Входные параметры называют факторами, выходные – откликами. Факторы рассматривают как детерминированные величины  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , отклик – как случайную величину  $Y$ . Закон распределения  $Y$  находится по результатам теоретических расчетов или по результатам экспериментальных исследований. Уравнение, связывающее отклик с факторами  $Y = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_k)$ , называют функцией отклика.

Обычно цель эксперимента состоит в нахождении функции отклика. В этом случае эксперимент называют интерполяционным, основанным на интерполяции – нахождении функции по некоторым ее значениям.

Более сложным является экстремальный эксперимент, предназначенный для получения оптимума. Критерий оптимальности назначается исследователем. В математическом смысле целью экстремальных экспериментов является поиск экстремума функции отклика.

При экспериментальных исследованиях надежности изделий широкое распространение получил интерполяционный эксперимент.

Вид функции отклика (линейная, степенная, логарифмическая и т.д.) объекта исследования предварительно устанавливают исходя из физических представлений об объекте или на основе опыта предыдущих исследований.

При отсутствии таких сведений функцию отклика представляют как результат ее разложения в ряд Тейлора, т.е. используют математическую модель в виде полинома. В простейшем случае выбирают полином первого порядка, линейный по всем переменным:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i,$$

где  $\beta_0$  и  $\beta_i$  – коэффициенты функции.

Если необходимо учитывать взаимодействие факторов, то функция отклика несколько усложняется:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_{0i} X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j,$$

где  $i \neq j$ .

Для описания области, близкой к оптимуму, выбирают полином второго порядка

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum \beta_{ii} x_i^2.$$

Использование полиномов выше второго порядка встречается довольно редко.

Для тех же полиномиальных зависимостей, но найденных на основе экспериментов, вместо величины  $Y$  определяется оценка ее среднего значения  $\hat{Y}$ , а вместо коэффициентов  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$  – их оценки  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$ .

Если при выборе модели у исследователя нет оснований отдать предпочтение одной из трех указанных выше функций, то начинать надо с простейшей – линейной функции. По результатам испытаний проверяют адекватность модели, т.е. ее соответствие реальности. В случае отрицательного результата переходят к более сложной модели.

Факторы, подлежащие исследованию, обусловлены целью эксперимента. Следует учитывать, что на отклик оказывают влияние и другие факторы, среди которых есть неуправляемые.

В процессе экспериментов исследуемые факторы варьируют, а остальные поддерживают на постоянном уровне. Чтобы исключить влияние неуправляемых факторов, им задают среднее значение или их рандомизируют, т.е. делают случайными. Рандомизация усредняет по всем опытам действие неуправляемых факторов.

К исследуемым факторам предъявляют следующие требования:

*управляемость* – возможность устанавливать и удерживать фактор на выбранных уровнях;

*независимость* – возможность устанавливать фактор на выбранных уровнях вне зависимости от уровней других факторов;

*совместимость* – возможность реализации всех комбинаций факторов.

## 3.2. Испытания для контроля вероятности безотказной работы

### Основные термины

*План испытаний* – совокупность правил, определяющих продолжительность испытаний и принятие решений в зависимости от суммарного учитываемого числа наблюдений (проб, опытов) и учитываемого числа отказов (неудач), достигнутых (накопленных) на данный момент испытаний.

*Приемочный уровень* – пороговое значение ВБР для принятия решения о приемке изделий. Решение о приемке принимают, если истинное значение ВБР равно или более приемочного уровня.

*Браковочный уровень* – пороговое значение ВБР для принятия решения о браковке изделий. Решение о браковке принимают, если истинное значение ВБР равно или менее браковочного уровня.

*Риск поставщика (изготовителя)* – вероятность принятия решения о браковке изделий при условии, что истинное значение ВБР равно или более приемочного уровня.

*Риск потребителя* – вероятность принятия решения о приемке изделий при условии, что истинное значение ВБР равно или менее браковочного уровня.

В соответствии с требованиями ГОСТ 27.003 показатель безотказности ВБР устанавливают для изделий конкретного назначения в соответствии с табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

Применение изделия по назначению	Возможность восстановления изделия после отказа	Показатель ВБР
Изделия непрерывного длительного применения	Невосстанавливаемые	$P(t_{б.р})$
Изделия многократного циклического применения	Невосстанавливаемые	$P_{вкл}$ или $P_0$
Изделия однократного применения	Восстанавливаемые	$P(t_{б.р})$
	Невосстанавливаемые	$P(t_{ож})$ и $P(t_{б.р})$ или $P_0$

Здесь  $P(t_{б.р})$  – вероятность безотказной работы в течение  $t_{б.р}$ ;

$P_{вкл}$  – вероятность безотказного включения

$P_0$  – вероятность безотказного срабатывания;

$P(t_{ож})$  – вероятность безотказного ожидания применения по назначению в течение времени  $t_{ож}$ .

Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы основаны на предположении, что испытания являются статистически независимыми и значение ВБР является постоянным.

Наработку изделий  $t_{б.р}$  измеряют временем их работы в часах или величинами, пропорциональными времени: количеством выпущенной продукции (шт.), пробегом (км), числом циклов срабатываний, оборотов и др.

Планы испытаний представляют в виде таблиц значений и графиков границ приемки и браковки в координатах:

ось абсцисс (дискретная) – суммарное учитываемое число наблюдений;

ось ординат (дискретная) – суммарное учитываемое число отказов.

По результатам испытаний принимают одно из следующих решений:

- ВБР соответствует заданным требованиям (приемка);
- ВБР не соответствует заданным требованиям (браковка).

Исходными данными для выбора плана испытаний являются:

- значения приемочного  $P_\alpha$  и браковочного  $P_\beta$  уровней (значение разрешающего коэффициента  $D$ );
- значения риска поставщика  $\alpha$  и потребителя  $\beta$ .

### Виды планов испытаний, их характеристики и ограничения применения

В зависимости от вида границ установлены два следующих вида планов испытаний:

- ограниченные числом наблюдений или числом отказов (одноступенчатые);
- усеченные последовательные.

Одноступенчатый план испытаний предусматривает фиксированный объем выборки, необходимый для принятия решения.

При усеченном последовательном плане объем выборки не фиксируется заранее, а определяется в процессе анализа статистических данных, получаемых последовательно по мере их поступления.

Виды планов испытаний приведены в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

Виды планов испытаний

Вид плана и обозначения управляющих параметров	Наименование вида плана и его характеристики
	<p>Одноступенчатый план Имеет два управляющих параметра: <math>c, N</math> Устойчив к возможной приработке изделий в начале испытаний – риск поставщика изменяется незначительно</p>
	<p>Усеченный последовательный план Имеет четыре управляющих параметра: <math>c, N, r_0, n_0</math> Дает экономию объемов испытаний до 40% и более по сравнению с одноступенчатым планом. Неустойчив к возможной приработке изделий в начале испытаний – возрастает риск поставщика</p>

Здесь

$n$  – суммарное число наблюдений на данный момент испытаний;

$n_0$  – точка пересечения границы приемки последовательного плана испытаний с осью абсцисс на графике планов испытаний;

$r$  – суммарное учитываемое число отказов на данный момент испытаний;

$r_0$  – точка пересечения границы браковки последовательного плана испытаний с осью ординат на графике планов испытаний.

Границы приемки на графиках табл. 3.2 обозначены знаком "плюс", а границы браковки – знаком "минус". Линии границ разбивают все множество точек на три области: несоответствия, соответствия и продолжения испытаний.

Характеристикой, определяющей экономичность (оптимальность) планов испытаний, является  $N_0(P)$  – среднее ожидаемое число наблюдений до принятия решения о приемке или браковке при  $P=P_\alpha$ .

Основным ограничением при выборе плана испытаний является максимально возможное число наблюдений и/или число изделий, которые могут быть подвергнуты испытаниям  $N$ .

Другим ограничением может быть календарная продолжительность испытаний. При этом учитывают число одновременно испытываемых изделий и возможные перерывы в процессе испытаний по любым техническим, организационным или иным причинам.

### Исходные данные для выбора планов испытаний

Выбор исходных данных для планов испытаний осуществляют в следующем порядке:

- задают значения приемочного  $P_\alpha$  и браковочного  $P_\beta$  уровней;
- устанавливают значения рисков поставщика  $\alpha$  и потребителя  $\beta$ .

Значения уровней  $P_\alpha$  и  $P_\beta$  задают поставщик и потребитель по согласованному решению. Рекомендуются  $P_\alpha$  и  $P_\beta$  устанавливать таким образом, чтобы значение  $P_3$  находилось в интервале  $[(P_\alpha+P_\beta)/2, P_\alpha]$  ближе к приемочному уровню  $P_\alpha$ .

Уровни  $P_\alpha$  и  $P_\beta$  допускается задавать двумя равнозначными способами:  $(P_\alpha$  и  $P_\beta)$  или  $(P_\alpha$  и  $D)$ . При втором способе значение разрешающего коэффициента  $D$  рекомендуется выбирать из ряда: 1,5; 2,0; 3,0.

Значение риска потребителя  $\beta$  устанавливает потребитель по своему усмотрению. Значение риска поставщика  $\alpha$  задает поставщик, по своему усмотрению, равным значению  $\beta$  или больше него.

Далее приведены таблицы с равными значениями  $\alpha$  и  $\beta$ .

Значения рисков рекомендуется выбирать из ряда: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3.



Не рекомендуется устанавливать исходные данные, сочетающие большие значения разрешающего коэффициента с малыми значениями рисков. Такие исходные данные следует изменять путем уменьшения значения разрешающего коэффициента и увеличения значений рисков.

Рекомендуемые соотношения исходных данных для планов испытаний приведены в табл. 3.3.

Т а б л и ц а 3.3

Рекомендуемые соотношения исходных данных

$D$	$P_\alpha$	$\alpha=\beta$
1,50-1,75	0,9995	0,05
	0,9990	0,10
	0,9950	0,20
1,75-2,00	От 0,99 до 0,90 с шагом 0,01	0,10
		0,20
		0,30
2,00-2,50	0,8500	0,20
		0,30
3,00	0,8000	0,20

### Выбор плана испытаний

Определяют вид плана испытаний.

Одноступенчатые планы испытаний применяют в том случае, если:

- экономия затрат на проведение испытаний не имеет существенного (решающего) значения;
- возможен период приработки изделий в начале испытаний.

Последовательные усеченные планы испытаний применяют в том случае, если:

- экономия затрат на проведение испытаний имеет существенное значение;
- отсутствует период приработки изделий в начале испытаний.

Из планов испытаний, соответствующих установленному (заданному) набору исходных данных, выбирают конкретный план испытаний определенного вида, наиболее подходящий к конкретным условиям с учетом ограничения максимального числа наблюдений  $N$  (максимальной продолжительности испытаний).

При этом следует иметь в виду, что в конкретных условиях ограничение  $N$  отличается от значений, установленных в стандартах, и то, что поставщик может быть готов рисковать больше потребителя.

В этих случаях могут быть более предпочтительными другие планы испытаний.

Допускается применять другой план испытаний, если имеется возможность вычислить его характеристики и установить, что выбранный (найденный) план испытаний является предпочтительным.

### Методика испытаний и правила принятия решений

Изделие (или несколько изделий) подвергаются испытаниям в соответствии с программой испытаний и последовательно суммируют учитываемое число наблюдений и учитываемое число отказов.

По результатам суммирования наблюдений и отказов строят график плана испытаний в виде ступенчатой линии реализации процесса отказов, состоящей из единичных горизонтальных или диагональных скачков, как показано на рис. 3.2.

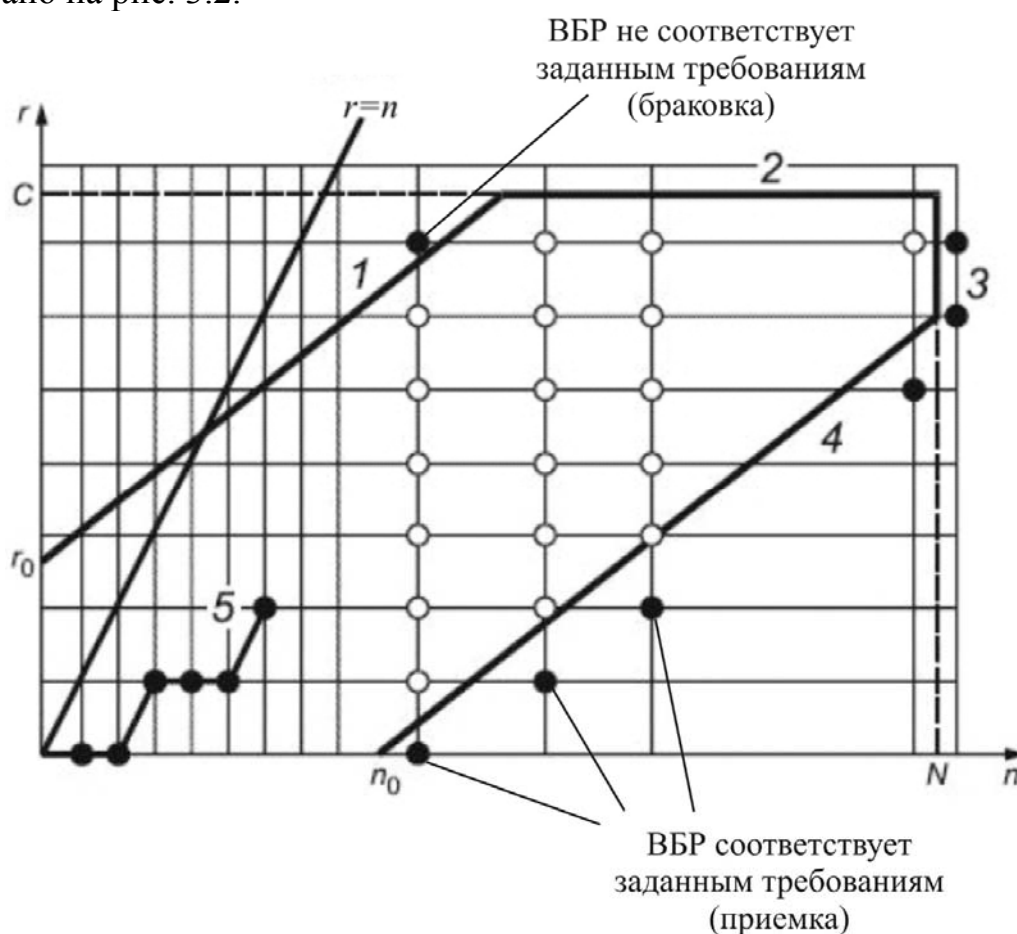


Рис. 3.2. График плана испытаний:  
1 и 2 – границы браковки; 3 и 4 – границы приемки;  
5 – линия реализации процесса отказов

Очевидно, что линия реализации процесса отказов не может попадать в область, расположенную на рисунке выше границы  $r=n$ .

Испытания продолжают до тех пор, пока линия реализации процесса отказов впервые не пересечет границу приемки или браковки плана испытаний.

В зависимости от того, какую из границ плана испытаний пересекла линия реализации процесса отказов, испытания завершают и принимают соответствующее решение.

### Рекомендуемые планы испытаний

Планы испытаний двух видов (одноступенчатые и усеченные последовательные) приведены в табл. 3.4 и 3.5.

Т а б л и ц а 3.4

#### Одноступенчатые планы испытаний

$P_\alpha$	$D$	$\alpha=\beta=5\%$		$\alpha=\beta=10\%$		$\alpha=\beta=20\%$		$\alpha=\beta=30\%$	
		$N$	$c$	$N$	$c$	$N$	$c$	$N$	$c$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,9995	1,50	108002	66	65849	40	28584	17	10814	6
	1,75	51726	34	32207	21	14306	9	5442	3
	2,00	31410	22	20125	14	9074	6	3615	2
	3,00	10476	9	6181	5	2852	2	1626	1
0,9990	1,50	53998	66	32922	40	14291	17	5407	6
	1,75	25861	34	16102	21	7152	9	2721	3
	2,00	15703	22	10061	14	4537	6	1807	2
	3,00	5232	9	3090	5	1426	2	813	1
0,9950	1,50	10647	65	6581	40	2857	17	1081	6
	1,75	5186	34	3218	21	1429	9	544	3
	2,00	3137	22	1893	13	906	6	361	2
	3,00	1044	9	617	5	285	2	162	1
0,9900	1,50	5320	65	3215	39	1428	17	540	6
	1,75	2581	34	1607	21	714	9	272	3
	2,00	1567	22	945	13	453	6	180	2
	3,00	521	9	308	5	142	2	81	1
0,9800	1,50	2620	64	1605	39	713	17	270	6
	1,75	1288	34	770	20	356	9	136	3
	2,00	781	22	471	13	226	6	90	2
	3,00	259	9	153	5	71	2	40	1
0,9700	1,50	1720	63	1044	38	450	16	180	6
	1,75	835	33	512	20	237	9	90	3
	2,00	519	22	313	13	150	6	60	2
	3,00	158	8	101	5	47	2	27	1
0,9600	1,50	1288	63	782	38	337	16	135	6
	1,75	625	33	383	20	161	8	68	3
	2,00	374	21	234	13	98	5	45	2
	3,00	117	8	76	5	35	2	20	1
0,9500	1,50	1014	62	610	37	269	16	108	6
	1,75	486	32	306	20	129	8	54	3
	2,00	298	21	187	13	78	5	36	2
	3,00	93	8	60	5	28	2	16	1

Окончание табл. 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,9400	1,50	832	61	508	37	224	16	90	6
	1,75	404	32	244	19	107	8	45	3
	2,00	248	21	155	13	65	5	30	2
	3,00	77	8	50	5	23	2	13	1
0,9300	1,50	702	60	424	36	192	16	77	6
	1,75	336	31	208	19	92	8	38	3
	2,00	203	20	125	12	55	5	25	2
	3,00	66	8	42	5	20	2	11	1
0,9200	1,50	613	60	371	36	168	16	67	6
	1,75	294	31	182	19	80	8	34	3
	2,00	177	20	109	12	48	5	22	2
	3,00	57	8	37	5	17	2	10	1
0,9100	1,50	536	59	329	36	149	16	60	6
	1,75	253	30	154	18	71	8	30	3
	2,00	157	20	96	12	43	5	20	2
	3,00	51	8	33	5	15	2	9	1
0,9000	1,50	474	58	288	35	134	16	53	6
	1,75	227	30	138	18	64	8	27	3
	2,00	135	19	86	12	39	5	18	2
	3,00	41	7	25	4	14	2	8	1
0,8500	1,50	294	54	181	33	79	14	35	6
	1,75	141	28	87	17	42	8	18	3
	2,00	85	18	53	11	21	4	12	2
	3,00	26	7	16	4	9	2	5	1
0,8000	1,50	204	50	127	31	55	13	26	6
	1,75	98	26	61	16	28	7	13	3
	2,00	60	17	36	10	19	5	9	2
	3,00	17	6	9	3	4	1	4	1

Таблица 3.5

## Последовательные планы испытаний

$P_\alpha$	$D$	$\alpha=\beta=0,05$			$\alpha=\beta=0,10$			$\alpha=\beta=0,20$			$\alpha=\beta=0,30$		
		$r_0$	$N$	$c$	$r_0$	$N$	$c$	$r_0$	$N$	$c$	$r_0$	$N$	$c$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,999	1,50	7,2529	102220	121	5,4123	61291	72	3,4148	25125	29	2,0871	8819	10
	1,75	5,2545	47677	60	3,2910	20040	36	2,4739	11334	14	1,5120	4093	5
	2,00	4,2418	28536	38	3,1654	16563	22	1,9971	6930	9	1,2206	2197	3
	3,00	2,6753	8609	14	1,9964	4932	8	1,2596	1718	3	0,7698	973	2
0,995	1,50	7,2171	20038	119	5,3856	12037	71	3,3979	5025	29	2,0768	1766	10
	1,75	5,2263	9269	59	3,9000	5561	35	2,4606	2269	14	1,5039	917	5
	2,00	4,2173	5458	37	3,1471	3296	22	1,9856	1384	9	1,2136	439	3
	3,00	2,6557	1540	13	1,9818	971	8	1,2504	342	3	0,7642	194	2
0,990	1,50	7,1723	9803	117	5,3522	5012	70	3,3709	2508	29	2,0639	883	10
	1,75	5,1910	4530	58	3,8737	2765	35	2,4440	1129	14	1,4938	406	5
	2,00	4,1866	2634	36	3,1242	1638	22	1,9711	691	9	1,2047	220	3

Окончание табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	3,00	2,6313	767	13	1,9635	482	8	1,2388	173	3	0,7572	97	2
0,980	1,50	7,0827	4713	113	5,2853	2856	68	3,3347	1196	28	2,0381	493	10
	1,75	5,1204	2169	56	3,8210	1329	34	2,4108	560	14	1,4735	204	5
	2,00	4,1252	1263	35	3,0784	767	21	1,9422	340	9	1,1871	108	3
	3,00	2,5822	374	13	1,9269	234	8	1,2157	83	3	0,7431	48	2
0,970	1,50	6,9931	3015	109	5,2184	1833	66	3,2925	760	27	2,0123	291	10
	1,75	5,0498	1389	54	3,7683	827	32	2,3775	371	14	1,4531	134	5
	2,00	4,0637	817	34	3,0325	481	20	1,9133	193	8	1,1694	73	3
	3,00	2,5329	228	12	1,8901	152	8	1,1925	57	3	0,7289	32	2
0,960	1,50	6,9034	2220	107	5,1515	1356	65	3,2503	571	27	1,9865	216	10
	1,75	4,9791	1017	53	3,7155	619	32	2,3442	255	13	1,4328	101	5
	2,00	4,0022	589	33	2,9865	361	20	1,8843	146	8	1,1517	55	3
	3,00	2,4835	170	12	1,8532	99	7	1,1693	43	3	0,7146	24	2
0,950	1,50	6,8137	1721	105	5,0846	1047	63	3,2080	436	26	1,9607	176	10
	1,75	4,9083	701	51	3,6627	476	31	2,3109	201	13	1,4121	79	5
	2,00	3,9406	455	32	2,9406	286	20	1,8553	116	8	1,1339	43	3
	3,00	2,4337	133	12	1,8161	79	7	1,1459	32	3	0,7003	19	2
0,940	1,50	6,7240	1419	103	5,0176	857	62	3,1658	363	26	1,9349	126	9
	1,75	4,8375	636	50	3,6099	383	30	2,2776	167	13	1,3920	65	5
	2,00	3,8788	366	31	2,8945	238	20	1,8262	94	8	1,1162	36	3
	3,00	2,3838	103	11	1,7789	62	7	1,1223	26	3	0,6860	16	2
0,930	1,50	6,6342	1117	100	4,9506	722	61	3,1235	299	25	1,9091	108	9
	1,75	4,7666	533	49	3,5570	327	30	2,2442	143	13	1,3716	56	5
	2,00	3,8170	303	30	2,8484	192	19	1,7971	82	8	1,0984	31	3
	3,00	2,3336	86	11	1,7414	54	7	1,0987	23	3	0,6715	13	2
0,920	1,50	6,5444	1008	98	4,8836	609	59	3,0812	249	24	1,8832	93	9
	1,75	4,6956	455	48	3,5040	276	30	2,2108	115	12	1,3512	48	5
	2,00	3,7551	264	30	2,8022	158	18	1,7680	70	8	1,086	26	3
	3,00	2,2831	74	11	1,7037	46	7	1,0749	19	3	0,6570	11	2
0,910	1,50	6,4546	881	86	4,8166	589	57	3,0389	220	24	1,8574	85	9
	1,75	4,6246	395	47	3,4510	236	29	2,1774	102	12	1,3308	43	5
	2,00	3,6931	234	30	2,7559	132	17	1,7388	63	8	1,0627	22	3
	3,00	2,2323	64	11	1,6658	39	6	1,0510	17	3	0,6424	10	2
0,900	1,50	6,3647	772	85	4,7495	461	56	2,9966	190	23	1,8315	75	9
	1,75	4,5535	343	46	3,3980	212	28	2,1439	92	12	1,3103	38	5
	2,00	3,6309	204	28	2,7095	119	17	1,7095	49	7	1,0448	20	3
	3,00	2,1812	54	10	1,6277	32	6	1,0269	15	3	0,6277	9	2
0,850	1,50	5,9144	457	84	4,4135	278	51	2,7846	114	21	1,7020	53	8
	1,75	4,1968	204	41	3,1318	119	24	1,9759	55	11	1,2077	21	4
	2,00	3,3184	115	25	2,4763	69	15	1,5624	31	7	0,9549	13	3
	3,00	1,9195	31	9	1,4324	19	6	0,9038	9	3	0,5524	6	2
0,850	1,50	5,4628	304	75	4,0765	187	46	2,5720	77	19	1,5720	28	7
	1,75	3,8376	137	37	2,8637	81	22	1,8060	36	10	1,1043	13	4
	2,00	3,0020	78	23	2,2402	44	13	1,4134	20	6	0,8639	10	2
	3,00	1,6433	17	7	1,2263	12	5	0,7737	5	2	0,4729	4	2

## Теоретические основы планов испытаний

### Одноступенчатый план

Оперативная характеристика – вероятность принятия основной гипотезы  $P_{H_0}$  – представляет собой формулу биномиального распределения

$$L(P) = P_{H_0} = \sum_{i=0}^{c-1} C_N^i P^{N-i} (1-P)^i,$$

где  $P$  – значение ВБР;

$N$  – максимальное число наблюдений;

$c$  – предельное браковочное число отказов.

Таким образом,  $P_{H_0}$  равна вероятности того, что при проведении  $N$  наблюдений число отказов будет меньше  $c$ .

Общий вид зависимости  $L(P)$  при фиксированных значениях  $N$  и  $c$  представлен на рис. 3.3.

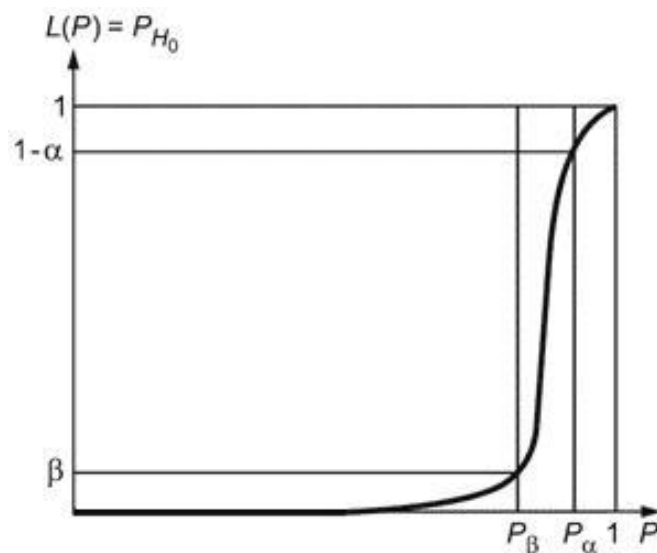


Рис. 3.3. Зависимость  $L(P)$  при фиксированных значениях  $N$  и  $c$

План испытаний выбирают следующим образом. Для заданных значений  $P_{\alpha}$ ,  $P_{\beta}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  подбирают пару целочисленных значений  $N$  и  $c$  таким образом, чтобы одновременно выполнялись равенства

$$1 - \alpha = \sum_{i=0}^{c-1} C_N^i P_{\alpha}^{N-i} (1 - P_{\alpha})^i,$$

$$\beta = \sum_{i=0}^{c-1} C_N^i P_{\beta}^{N-i} (1 - P_{\beta})^i.$$

Для проведения необходимых вычислений по приведенным формулам следует использовать любую прикладную компьютерную программу по

статистическим методам, где имеется формула биномиального распределения (например *MS Excel*).

#### Усеченный последовательный план

Вероятность принятия основной гипотезы как функции неизвестного значения  $P$  не может быть представлена формулой простого вида – биномиального распределения, как в случае для одноступенчатого плана.

Объем выборки, необходимый для принятия решения, не фиксируется заранее, а определяется в процессе анализа статистических данных, получаемых последовательно по мере их поступления.

Границы неусеченного последовательного плана испытаний представляют собой две наклонные прямые линии:

$r=an+r_0$  – линия несоответствия (браковки);

$r=a(n-n_0)$  – линия соответствия (приемки).

Константы, входящие в формулы, равны:

$$a = \frac{\ln\left(\frac{P_\alpha}{P_\beta}\right)}{\ln D + \ln\left(\frac{P_\alpha}{P_\beta}\right)},$$

$$r_0 = \frac{\ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)}{\ln D + \ln\left(\frac{P_\alpha}{P_\beta}\right)},$$

$$n_0 = \frac{\ln\left(\frac{1-\alpha}{\beta}\right)}{\ln\left(\frac{P_\alpha}{P_\beta}\right)}.$$

Следует учитывать дискретный (целочисленный) характер множества точек в пределах координат графика последовательного плана. Линии границ разбивают все множество точек на три области: несоответствия, соответствия и продолжения испытаний.

Преимуществом последовательного плана является минимизация среднего числа наблюдений.

Истинные значения рисков  $\alpha'$ ,  $\beta'$  в последовательном плане не равны установленным значениям  $\alpha$ ,  $\beta$ . Известно, что сумма значений истинных рисков не превышает суммы значений установленных, т.е.

$$\alpha' + \beta' < \alpha + \beta,$$

и если один истинный риск больше заданного, то другой – обязательно меньше.

Границы усеченного последовательного плана испытаний вычисляют следующим образом:

- установленные значения  $\alpha$  и  $\beta$  умножают на коэффициент  $K$  меньше единицы. В диапазоне значений  $\alpha = 0,05-0,2$  рекомендуемое значение  $K=0,9$ ;

- определяют границы последовательного плана испытаний по формулам, приведенным выше;

- вычисляют границы одноступенчатого плана испытаний  $N$  и  $c$  по формулам, приведенным выше, с помощью любой программы по статистическим методам, содержащей формулу биномиального распределения;

- увеличивают границы  $N$  и  $c$  на 5-7 %, округляют их до целых значений и используют для усечения последовательного плана испытаний.

Рекомендуемый способ усечения является эвристическим и основан на исследованиях свойств планов испытаний для контроля средней наработки до отказа или на отказ.

#### Комбинированный план

Комбинированный план изображен на рис. 3.4. Его верхняя граница несоответствия представляет собой горизонтальную прямую.

Чтобы получить расчетные формулы, следует рассмотреть вертикальные сечения в точках границы приемки и ввести следующие обозначения:

$k$  – порядковый номер сечения,  $k=0, \dots, r-1$ ;

$N_k$  – число наблюдений к  $k$ -му сечению;

$\Delta N_k$  – число наблюдений, необходимое для перехода от  $(k-1)$ -го сечения к  $k$ -му сечению;

$p_i^k$  – вероятность попадания линии реализации в  $k$ -м сечении на  $i$ -й уровень.

Вероятности попадания линии реализации в точки сечений вычисляют последовательно, начиная с  $k=0$ , по формулам:

$$p_0^0 = P^{\Delta N_0},$$

$$p_1^0 = \Delta N_0 P^{\Delta N_0 - 1} (1 - P),$$

$$p_s^0 = C_{\Delta N_0}^s \Delta N_0 P^{\Delta N_0 - s} (1 - P)^s,$$

где  $s = \min \{ \Delta N_0, r-1 \}$ .

Для произвольного  $k$ -го сечения

$$p_k^k = p_k^{k-1} P^{\Delta N_k};$$

$$p_{k+1}^k = p_k^{k-1} \Delta N_k P^{\Delta N_{k-1}} (1 - P) + p_{k+1}^{k-1} P^{\Delta N_k}$$

при  $k=0, \dots, r-1$ .



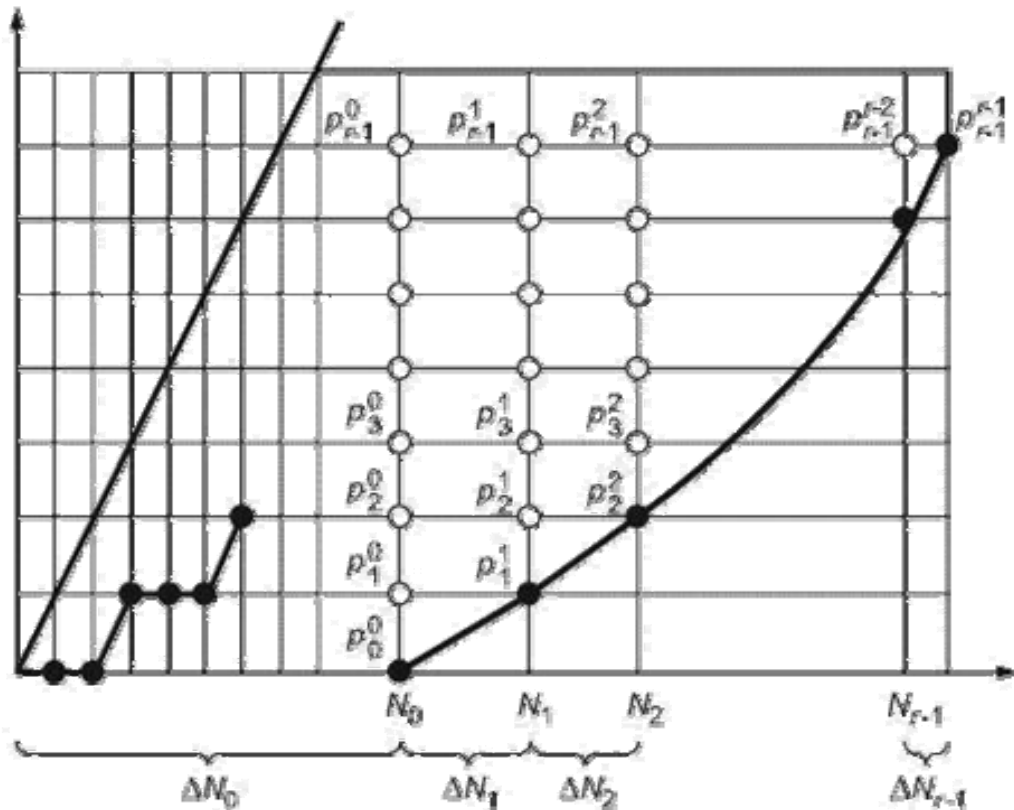


Рис. 3.4. Комбинированный план

При браковочном  $P_\beta$  и приемочном  $P_\alpha$  значениях ВБР сумма вероятностей достижения границы приемки равна соответственно значению риска потребителя  $\beta$  и дополнению до единицы риска поставщика  $\alpha$ .

Таким образом, зная (или устанавливая) границы плана, можно вычислить значения оперативной характеристики, включая значения рисков, и из нескольких видов планов выбрать подходящий. Для этих целей необходима программная реализация метода на персональном компьютере.

Боковую границу приемки плана определяют путем распределения значения риска заказчика, как квоты между вероятностями  $p_k^k$ . Задав требуемые значения  $p_{k^*}$  при  $k=0, \dots, r-1$ , последовательно находят искомые значения  $\Delta N_k$  из системы уравнений

$$p_k^k = p_k^{k-1} P_\beta^{\Delta N_k} = p_{k^*}.$$

Общее решение системы имеет вид

$$\Delta N_k = \frac{\ln\left(\frac{p_{k^*}}{p_k^{k-1}}\right)}{\ln P_\beta}.$$

Фактор дискретности значений  $\Delta N_k$  и  $N_k$  не позволяет получать точное решение системы уравнений. Значения истинных рисков всегда не равны установленным значениям. Перебор планов с округленными значениями

$\Delta N_k$  в обе стороны дает  $2'$  вариантов планов. Рекомендуется следующий прием округления: на каждом шаге, начиная с первого, округление выполняют так, чтобы сумма отклонений  $\Sigma \Delta p_{k*}$  была минимальной.

### 3.3. Испытания для контроля коэффициента готовности

Рассматриваемые испытания распространяются на восстанавливаемые (ремонтируемые) изделия, распределения наработок между отказами которых аппроксимируют экспоненциальным распределением, и предназначены для проверки соответствия коэффициента готовности испытываемого образца изделия заданным требованиям.

Контролируемыми показателями готовности являются стационарный коэффициент готовности и стационарный коэффициент технического использования (далее – коэффициент готовности).

Методы контроля в качестве контролируемого показателя используют также коэффициент простоя, дополняющий значения коэффициента готовности и коэффициента технического использования до единицы.

По результатам испытаний в отношении контролируемого показателя принимают одно из следующих решений:

- соответствие установленным требованиям (приемка);
- несоответствие установленным требованиям (браковка).

При испытаниях высоконадежного изделия отказ может не наступить, поэтому не могут быть получены количественные данные о готовности изделия. В подобных случаях заинтересованные стороны должны прийти к согласованному решению.

Исходными данными для выбора плана испытаний являются номинальный риск поставщика  $\alpha$  и риск потребителя  $\beta$ , а также приемочный и браковочный коэффициенты простоя (разрешающий коэффициент  $D$ ).

Планы испытаний, рассматриваемые ниже (ГОСТ 27.404), предназначены для непрерывно работающих изделий, готовность которых определяют относительно суммарного времени их эксплуатации. При использовании планов испытаний для изделий с прерывающимся режимом работы должны быть приняты соответствующие решения в отношении учета числа восстановлений изделия в перерывах между рабочими периодами.

Методы испытаний, рассматриваемые ниже (ГОСТ 27.404), применимы только для изделий, которые могут находиться в двух состояниях – работоспособном и неработоспособном.

Для сложных изделий может быть установлено несколько режимов работы. В этом случае планы испытаний следует применять отдельно для каждого режима работы изделия. При получении противоречащих друг другу результатов контроля готовности для разных режимов работы должны быть установлены требования к принятию решений.

В зависимости от вида контролируемого показателя составляющие времени пребывания изделия в неработоспособном состоянии подразделяют на учитываемые и неучитываемые. Классификация составляющих времени пребывания в неработоспособном состоянии должна быть установлена до начала испытаний.

### Распределения временных характеристик

Испытаниям подвергают работоспособное изделие. По истечении интервала времени возникает первый отказ и изделие переходит в неработоспособное состояние. После восстановления изделие возвращается в работоспособное состояние. Затем начинается новый цикл "работоспособность – отказ – неработоспособность – восстановление". Реализация этого процесса представлена на рис. 3.5.

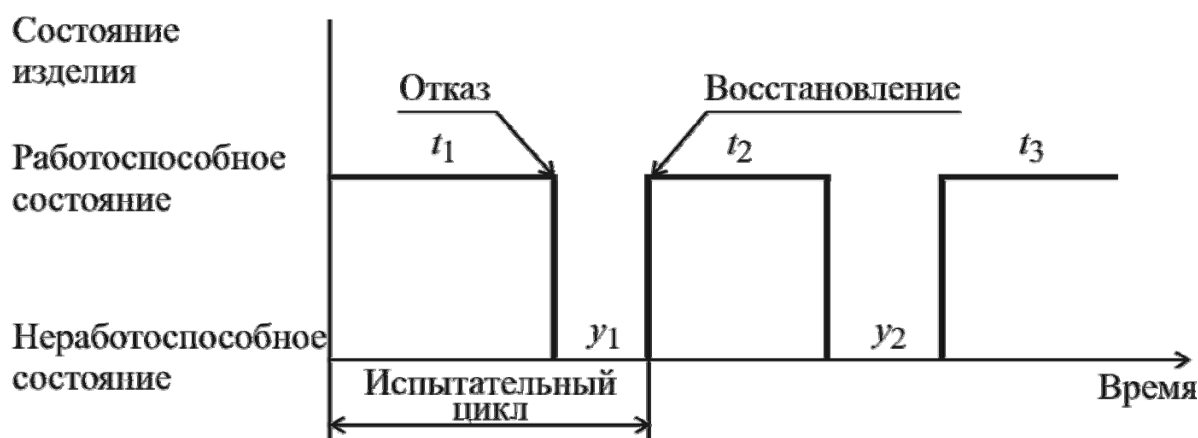


Рис. 3.5. Типовая реализация процесса функционирования изделий при испытаниях в виде испытательных циклов

В основе планов испытаний лежит предположение, что наработка изделия между отказами подчиняется закону экспоненциального распределения, а продолжительность пребывания в неработоспособном состоянии – закону гамма-распределения. Значение параметра формы  $p$  определяют по согласованию между поставщиком и потребителем до начала испытаний (по результатам испытаний аналогичных изделий) или оценивают по статистическим данным, полученным в процессе испытаний. При отсутствии информации допускается по согласованию между поставщиком и потребителем принимать  $p=1$  (экспоненциальное распределение продолжительности пребывания изделия в неработоспособном состоянии).

## Виды планов испытаний

### План испытаний с ограниченным числом отказов

Определяют число отказов  $n$ , которое должно быть получено в ходе испытаний как минимальное из возможных чисел, для которых выполняется неравенство

$$F_{1-\alpha}(2pn;2n) F_{1-\beta}(2n;2pn) \leq D(1-U_0)/(1-DU_0),$$

где  $F_{1-\alpha}(2pn;2n)$  – квантиль уровня  $(1-\alpha)$   $F$ -распределения с  $(2pn;2n)$  степенями свободы.

Вычисляют значение критерия принятия решения  $U_{\text{lim}}$  по формуле

$$U_{\text{lim}} = F_{1-\alpha}(2pn;2n)U_0/(1-U_0).$$

По результатам испытаний после получения  $n$  отказов находят значение  $Y/T$ .

Решение о приемке изделий принимают в случае, если  $Y/T \leq U_{\text{lim}}$ .

В противном случае принимают решение о браковке.

Значения  $F_{1-\alpha}(v_1, v_2)$  и  $F_{1-\beta}(v_1, v_2)$  приведены в справочной таблице «Квантили  $F$ -распределения с  $(v_1, v_2)$  степенями свободы».

## 3.4. Способы сокращения объема испытаний

Экспериментальные методы оценки надежности требуют значительного *объема испытаний*, под которым понимается произведение числа испытываемых образцов на длительность испытаний. Это не позволяет проводить надлежащие испытания по надежности изделий, выпускаемых малыми сериями, и задерживает получение достоверной информации о надежности до стадии, когда уже изготовлена технологическая оснастка и внесение изменений очень дорого. Поэтому целесообразным является сокращение объема испытаний при условии приемлемой достоверности полученных результатов.

Объем испытаний для оценки надежности сокращают следующими способами: 1) форсирование режимов; 2) оценка надежности по малому числу или отсутствию отказов; 3) сокращение числа образцов за счет увеличения длительности испытаний; 4) использование разносторонней информации о надежности деталей и узлов машины.

*Сокращение объема испытаний за счет форсирования режима.* Если известен характер зависимости ресурса системы от различных факторов (температура, напряжения и др.), то длительность испытаний можно сократить с времени  $t$  до времени  $t_{\phi}$  за счет форсирования режима испытаний:

$$t_{\phi} = t/K_y,$$

где  $K_y = \bar{t} / \bar{t}_{\phi}$  – коэффициент ускорения;

$\bar{t}$ ,  $\bar{t}_\phi$  – средние наработки до отказа в нормальном и форсированном режимах.

На практике длительность испытаний сокращают за счет форсирования режима до 10 раз.

При расчете надежности электрической изоляции принимают приближенно справедливым «правило 10 градусов»: при повышении температуры на 10 °С ресурс изоляции сокращается вдвое. Ресурс масел и смазок в опорах снижается вдвое с ростом температуры: на 9...10 °С – для органических и на 12...20 °С – для неорганических масел и смазок.

*Сокращение числа образцов за счет оценки надежности по отсутствию или малому числу отказов.* Этот способ заключается в следующем. Для испытаний отбирается определенное малое число изделий. Если количество отказов в этой выборке не превышает заданного значения (обычно число отказов в выборке принимается равным нулю), то считается, что вероятность безотказной работы изделий соответствует нормативно-технической документации. Чем меньше нижняя граница  $P_n$  вероятности безотказной работы, тем меньше требуется образцов для подтверждения того, что вероятность безотказной работы превышает заданное значение  $P_n$ .

Для подтверждения того, что  $\text{Вер}(P_n \leq P) = \alpha$ , необходимо испытать  $n = \frac{\lg(1 - \alpha)}{\lg P_n}$  изделий при условии, что отказов при испытании не возникнет.

*Сокращение числа образцов за счет увеличения длительности испытаний.* Этот способ применяется для изделий, подверженных внезапным отказам, в частности для радиоэлектронной аппаратуры, восстанавливаемых изделий. В большинстве случаев результаты пересчитывают на заданное время в предположении экспоненциального распределения отказов по времени. В этом случае объем испытаний  $nt$  остается практически постоянным, а число  $n$  испытываемых образцов становится обратно пропорциональным времени испытаний.

Если закон распределения отличается от экспоненциального, то объем испытаний можно сократить за счет увеличения длительности испытаний, так как в этом случае с увеличением длительности испытаний число испытываемых образцов сокращается более резко, чем при экспоненциальном законе. Данный способ оценки надежности предполагает проведение испытаний изделия в течение времени  $t_n > t$ , а затем – пересчет результатов испытаний по соответствующим формулам на время  $t$ .

*Сокращение объема испытаний за счет использования разносторонней информации о надежности элементов систем.* Данный метод уже давно применяют в авиации: самолет запускают в серийное производство, если стендовыми испытаниями узлов в предельных режимах работы установлена их практическая безотказность и, кроме того, если лидерные

самолеты (обычно 2 или 3 экземпляра) налетали без отказа по тройному ресурсу.

### Контрольные вопросы

1. На какие виды делятся испытания: а) по целям; б) по срокам проведения; в) по методу проведения; г) по этапам?
2. Каковы условия проведения приемосдаточных испытаний?
3. Каковы условия проведения периодических испытаний?
4. Каковы условия проведения гарантийных испытаний?
5. Что называется доверительной вероятностью (достоверностью)?
6. В чем заключается способ сокращения объема испытаний за счет форсирования режима?
7. В чем заключается способ сокращения числа образцов за счет оценки надежности по отсутствию или малому числу отказов?

## 4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Прогнозирование надежности – частный случай расчета надежности объекта на основе статистических моделей, отражающих тенденции изменения надежности объектов-аналогов и/или экспертных оценок. Другими словами, прогнозирование надежности технического объекта – это научное направление, изучающее методы предсказания технического состояния объекта при воздействии на него заданных факторов.

Прогнозирование применяется для определения остаточного ресурса систем, их технического состояния, числа ремонтов и технических обслуживаний, расхода запасных частей и решения других задач в области надежности.

Прогнозирование показателей надежности может производиться по разнообразным параметрам (например, по усталостной прочности, динамике процесса изнашивания, по виброакустическим параметрам, содержанию элементов износа в масле, по стоимости и трудовым затратам и т.д.).

### 4.1. Методы прогнозирования надежности

Методы прогнозирования применяют:

- для обоснования требуемого уровня надежности объектов при разработке технических заданий и/или оценки вероятности достижения заданных ПН при проработке технических предложений и анализе требований ТЗ (контракта).
- для ориентировочной оценки ожидаемого уровня надежности объектов на ранних стадиях их проектирования, когда отсутствует необходимая информация для применения других методов расчета надежности;
- для расчета интенсивностей отказов серийно выпускаемых и новых электронных и электротехнических элементов разных типов с учетом уровня их нагруженности, качества изготовления, областей применения аппаратуры, в которой используются элементы;
- для расчета параметров типовых задач и операций технического обслуживания и ремонта объектов с учетом конструктивных характеристик объекта, определяющих его ремонтпригодность.

Для прогнозирования надежности объектов применяют: методы эвристического прогнозирования (экспертной оценки); методы прогнозирования по статистическим моделям; комбинированные методы.

Методы эвристического прогнозирования основаны на статистической обработке независимых оценок значений ожидаемых ПН разрабатываемого объекта (индивидуальных прогнозов), даваемых группой квалифицированных специалистов (экспертов) на основе предоставленной им информации об объекте, условиях его эксплуатации, планируемой технологии

изготовления и других данных, имеющихся в момент проведения оценки. Опрос экспертов и статистическую обработку индивидуальных прогнозов ПН проводят общепринятыми при экспертной оценке любых показателей качества методами (например метод Дельфи).

Методы прогнозирования по статистическим моделям основаны на экстра- или интерполяции зависимостей, описывающих выявленные тенденции изменения ПН объектов-аналогов с учетом их конструктивно-технологических особенностей и других факторов, информация о которых для разрабатываемого объекта известна или может быть получена в момент проведения оценки. Модели для прогнозирования строят по данным о ПН и параметрах объектов-аналогов с использованием известных статистических методов – многофакторного регрессионного или факторного анализа, методов статистической классификации и распознавания образов.

Комбинированные методы основаны на совместном применении для прогнозирования надежности объектов методов прогнозирования по статистическим моделям и эвристических методов с последующим сравнением результатов. При этом эвристические методы применяют для оценки возможности экстраполяции используемых статистических моделей и уточнения прогноза по ним ПН. Применение комбинированных методов целесообразно в случаях, когда есть основания ожидать качественных изменений уровня надежности объектов, не отражаемых соответствующими статистическими моделями, или при недостаточном для применения только статистических методов числе объектов-аналогов.

#### **4.2. Встроенное прогнозирование изменения технического состояния мобильной техники**

Существующие методы прогнозирования технического состояния сложны и требуют больших затрат времени для получения и обработки опытных данных; рекомендуемые номограммы неудобны для практического применения.

В связи с тем что процесс изменения технического состояния носит случайный характер, в практике прогнозирования остаточного ресурса возможно установление остаточного ресурса по всей совокупности элементов или для конкретного диагностируемого элемента. При встроенном диагностировании на основе вероятностно-логической модели используется определение технического состояния агрегата в целом, а затем проводится поэлементное определение технического состояния.

Для условий эксплуатации с использованием встроенного диагностирования целесообразно после выбора аппроксимирующего выражения и нахождения коэффициентов преобразовывать их в одну определенную функцию, для которой разработать аппарат прогнозирования. В качестве



преобразованной функции выберем линейную, как наиболее простую и часто встречающуюся при изменении технического состояния элементов автомобилей. Помимо упрощения процесса прогнозирования, такое решение обеспечивает возможность совместного анализа совокупности элементов автомобиля и сопоставления их характеристик.

У значительной части узлов и деталей процесс изменения технического состояния в зависимости от времени или пробега автомобиля носит плавный, монотонный характер, приводящий к возникновению так называемых постепенных отказов.

Достаточно часто закономерности изменения параметров (например, зазора между накладками и тормозными барабанами, свободного хода педали сцепления и др.) описываются линейными уравнениями вида

$$y=a_0+a_1l,$$

- где  $a_0$  – начальное значение параметра технического состояния;  
 $a_1$  – интенсивность изменения параметра технического состояния, зависящая от конструкции и условий эксплуатации изделий;  
 $l$  – наработка.

Для полного использования ресурса автомобиля и объективного определения срока службы до его выхода в техническое обслуживание и ремонт необходима разработка простых методов прогнозирования, базирующихся на результатах измерения рационального количества параметров встроенного диагностирования, содержащих необходимую информацию о техническом состоянии базовых и основных систем и узлов. Достоверность прогнозирования технического состояния зависит от уровня соответствия теоретических расчетных зависимостей реальным условиям и режимам работы изделия, законам изнашивания деталей и точности измерения соответствующих параметров, используемых в качестве исходных физических величин.

Закономерности характеризуют тенденцию изменения параметров технического состояния, позволяют определить наработку до момента достижения допустимого или заданного состояния.

При встроенном диагностировании наблюдается изменение параметров с определенной тенденцией. Одни параметры уменьшаются, другие увеличиваются, третьи остаются неизменными. Причем эти изменения можно представить в виде формул, по которым определяется точка, когда необходимо проводить профилактическое воздействие, и выявляется остаточный ресурс контролируемого параметра (рис. 4.1).

Линейная функция обладает достаточной универсальностью, параметры имеют четкий физический смысл и их немного.

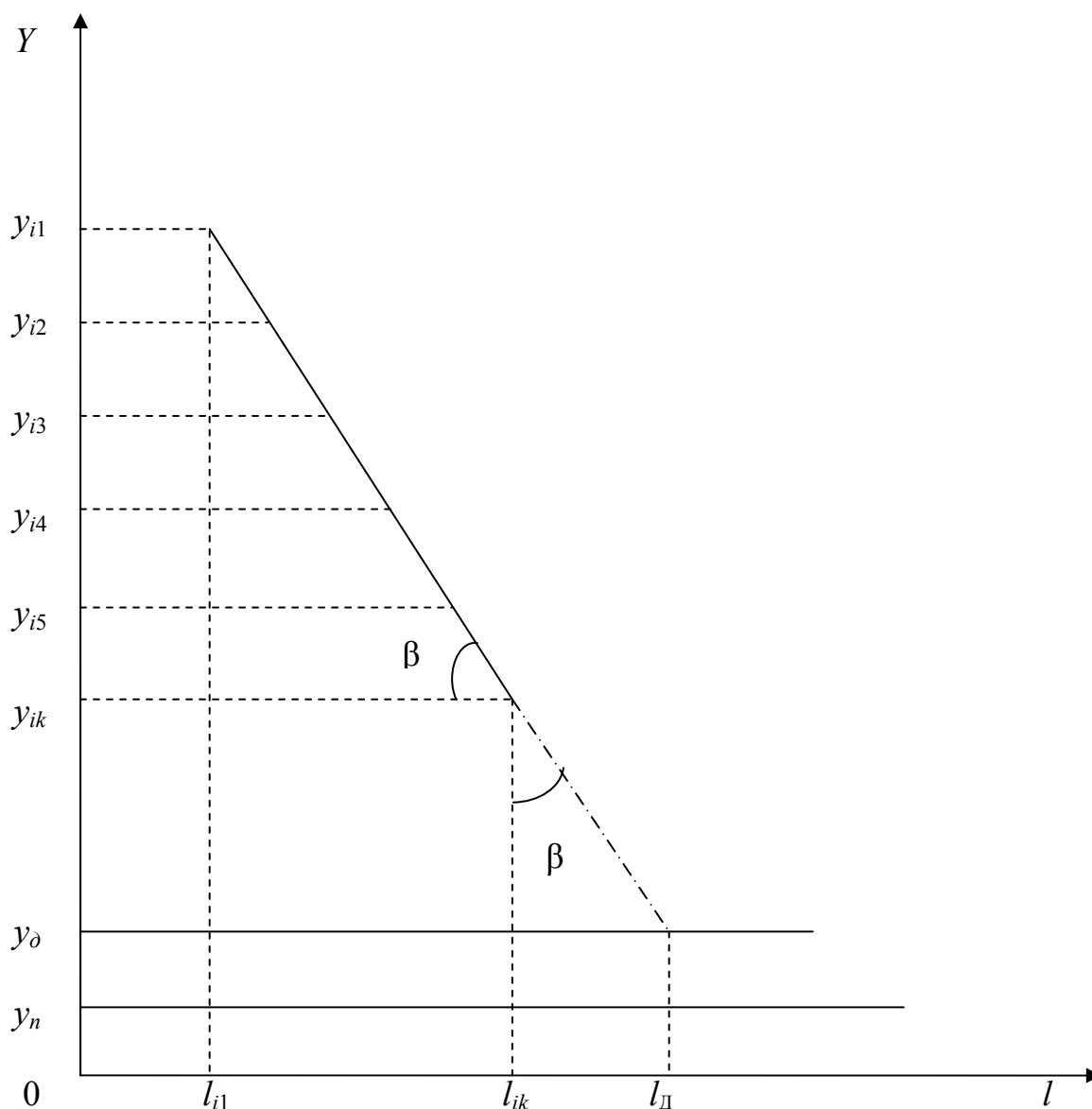


Рис. 4.1. Графическое изображение линейного прогнозирования технического состояния автомобилей при встроенном диагностировании:  
 $y_{i1}, \dots, y_{ik}$  — значение параметра к моменту  $l_{i1}, \dots, l_{ik}$ ;  $l_{i1}, \dots, l_{ik}$  — пробег, определенный встроенной системой диагностирования;  $y_{\partial}$  — допустимое значение параметра;  $y_{\Pi}$  — предельное значение параметра;  $\beta$  — угол изменения параметра;

Определение остаточного ресурса при встроенном диагностировании можно выполнить аналитическим путем по формуле

$$t_{\text{ост}} = t_{\text{д}} - l_{ik}.$$

Для определения остаточного ресурса данным способом необходимо знать не менее пяти значений измеряемого параметра при встроенном диагностировании, пробег, соответствующий этим значениям, а также

допустимые показатели этого параметра. При прямолинейном изменении параметра остаточный ресурс определится по формуле

$$t_{\text{ост}} = (y_i - y_d) \operatorname{tg} \beta.$$

Тангенс угла находим как отношение катетов:

$$\operatorname{tg} \beta = (l_{\text{п}} - l_{ik}) / (y_i - y_{ik}).$$

В случае постепенных линейных отказов остаточный ресурс достаточно хорошо может вычисляться по формуле

$$t_{\text{ост}} = (y_{\text{п}} - y_d)(l_{\text{п}} - l_{ik}) / (y_i - y_{ik}).$$

Устанавливая диапазон изменения структурных и диагностических параметров, можно прогнозировать изменение технического состояния по постепенным линейным отказам и тем самым предотвращать их, корректируя периодичность технического обслуживания и нормы расхода запасных частей, эксплуатационных материалов.

Изменения технического состояния мобильных транспортных средств могут быть представлены в виде функций, зависящих от времени или пробега. Для таких зависимостей наблюдается определенная связь между зависимой переменной величиной и независимой переменной величиной, когда определенному значению аргумента соответствует определенное значение функции. Наибольшее распространение получили зависимости пробега или времени эксплуатации от скорости изменения параметра технического состояния узла, агрегата, системы или мобильного транспортного средства в целом.

Для полного использования ресурса мобильной техники и объективного определения срока службы до достижения допустимого значения параметра необходима разработка простых методов прогнозирования, базирующихся на результатах измерения рационального количества параметров встроенного диагностирования, содержащих необходимую информацию о техническом состоянии базовых и основных деталей. Наиболее удобно для этого использовать данные встроенного диагностирования по тенденции изменения параметра, так как можно использовать значения последних более чем двух измерений, что позволяет более точно прогнозировать параметр. В данном случае достоверность прогнозирования технического состояния не зависит от теоретических расчетных зависимостей, а в первую очередь наблюдается зависимость от реальных условий и режима работы узла, детали, системы и точности измерения соответствующих параметров.

Ограничивая изменения диагностических параметров допустимым значением, можно прогнозировать изменение технического состояния по постепенным отказам и тем самым предотвращать их, корректируя

периодичность технического обслуживания и нормы расхода запасных частей, эксплуатационных материалов, а соответственно затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Для определения остаточного ресурса на основе встроенного диагностирования нет необходимости знать начальное значение измеряемого параметра, пробег с начала эксплуатации. Возникает необходимость в определении значения измеряемого параметра в данный момент времени и установлении функциональной зависимости. Для чего выявляют не менее пяти значений параметра, предшествующих замеренному, а также допустимые показатели этого параметра.

В целях определения характера кривой изменения параметра необходимо производить замер изменения параметра состояния испытываемых деталей сопряжений и узлов несколько раз. При прогнозировании остаточного ресурса конкретного элемента предполагается, что показатель степени для данного типа элементов не известен заранее и устанавливается на основе аппроксимации кривой, полученной встроенным диагностированием. Учет действительной закономерности изнашивания и измерения конкретных диагностических параметров транспортного средства в прошедший период необходим, так как в процессе эксплуатации изменяются условия эксплуатации мобильных транспортных средств, что приводит к корректировке прогнозируемого периода эксплуатации до допустимого значения.

Для разработки рекомендаций по рациональной технической эксплуатации, своевременному выполнению технического обслуживания транспортных средств требуется информация об изменении технического состояния. Такую информацию можно получить на основании определения параметров при встроенном диагностировании (рис. 4.2). К важнейшим относятся: изменение технического состояния автомобиля, агрегата, детали по времени работы или пробегу автомобиля; допустимые значения параметров технического состояния, предельные значения параметров до технического состояния. По этим параметрам определяют остаточный ресурс, что позволит установить продолжительность выполнения ремонтных и профилактических работ; сформировать поток профилактических воздействий на автомобиль или группу автомобилей.

Широко применяются при прогнозировании технического состояния автомобилей степенная, линейная и рациональная функции. Для определения момента достижения допустимого значения изменения параметра технического состояния автомобиля определяем точку пересечения прямой, равной  $y = y_d$ , и соответственно степенной, линейной и рациональной функций.

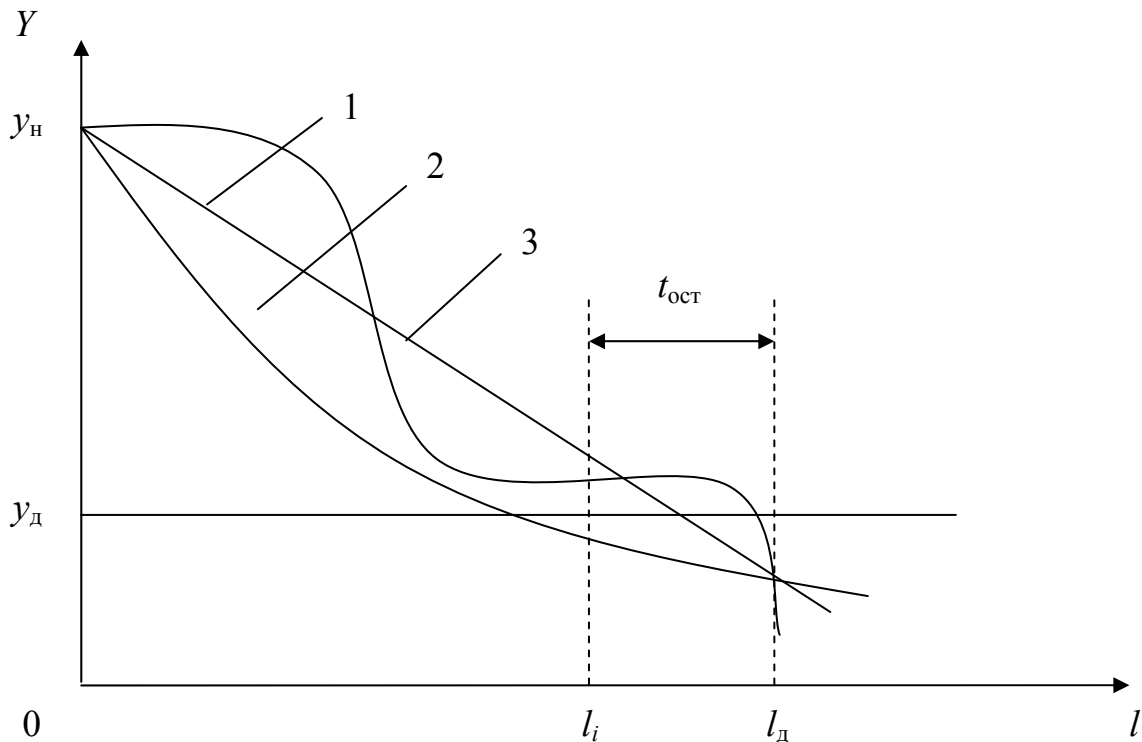


Рис. 4.2 Графическое изображение линейного, рационального и степенного прогнозирования технического состояния мобильной техники при встроенном диагностировании:  
 1 – линейное; 2 – степенное; 3 – рациональное;  $y_n$  – номинальное значение параметра;  $y_d$  – допустимое значение параметра;  $l_i$  – пробег до последнего встроенного диагностирования;  $l_d$  – допустимый пробег

Для целой рациональной функции  $n$ -го порядка

$$l_{др} = \begin{cases} y = a_0 + a_1 l + a_2 l^2 + \dots + a_n l^n, \\ y = y_d, \end{cases}$$

где  $a_0$  – начальное значение параметра технического состояния;  
 $l$  – наработка;  
 $a_1, a_2, \dots, a_n$  – коэффициенты, определяющие характер и степень зависимости  $y$  от  $l$ .

В силу случайного характера процесса изнашивания узлов и сопряжений двигателя и агрегатов трансмиссии изменение диагностических параметров всегда аппроксимируют некоторой функцией. На этой основе известно несколько методов прогнозирования технического состояния и определения остаточного ресурса агрегатов мобильной техники. Широкое распространение получили методы прогнозирования ресурса машин, в которых в качестве аппроксимирующей используется степенная функция.

Степенная функция обладает достаточной универсальностью, коэффициенты имеют четкий физический смысл и их немного. Этим объясняется широкое использование степенной функции в теории прогнозирования.

Для степенной

$$l_{\text{дс}} = \begin{cases} y = a_0 + a_1 l^b, \\ y = y_{\text{д}}, \end{cases}$$

где  $a_1$  и  $b$  – коэффициенты, определяющие интенсивность и характер изменения параметра технического состояния.

Для линейной

$$l_{\text{дл}} = \begin{cases} y = a_0 + a_1 l, \\ y = y_{\text{д}}, \end{cases}$$

где  $a_1$  – интенсивность изменения параметра технического состояния, зависящая от конструкций и условий эксплуатации изделий.

Для соответствующей кривой находим точку на графике соединения с допустимым значением и устанавливаем допустимый пробег на оси абсцисс  $l_{\text{д}}$ , тогда остаточный ресурс определится по формуле

$$t_{\text{ост}} = t_{\text{д}} - l_i.$$

Функции, определенные на основе встроенного диагностирования, обладают достаточной универсальностью, коэффициенты имеют четкий физический смысл. Этим объясняется широкое использование степенной, линейной и рациональной функций при прогнозировании технического состояния мобильной техники.

## Контрольные вопросы

1. Методы прогнозирования надежности.
2. Методы эвристического прогнозирования (экспертной оценки).
3. Методы прогнозирования по статистическим моделям.
4. Комбинированные методы.
5. Встроенное линейное прогнозирование изменения технического состояния мобильной техники.
6. Встроенное степенное прогнозирование изменения технического состояния мобильной техники.
7. Встроенное рациональное прогнозирование изменения технического состояния мобильной техники.

## 5. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ

### 5.1. Термины и определения системы управления надежностью

*Предприятие* – организация любой ведомственной принадлежности и формы собственности, осуществляющая деятельность на стадиях жизненного цикла изделия: заказывающая, проектирующая, разрабатывающая, изготавливающая, испытывающая, поставляющая, транспортирующая, монтирующая, обслуживающая, ремонтирующая или утилизирующая изделие.

*Система управления надежностью (СУН)* – совокупность всех средств предприятия по управлению надежностью.

*Объект СУН* – объект (изделие, система, комплекс, комплект), рассматриваемый отдельно с позиции управления надежностью и состоящий из технических или программных средств или их сочетания. Объект СУН может включать в себя персонал.

*Элемент СУН* – часть СУН, необходимая для выполнения определенной функции (группы функций) по управлению надежностью.

*Управление надежностью* – совокупность координируемых действий, являющихся частью общего управления предприятием и осуществляемых в целях выполнения требований к надежности изделий.

*Обеспечение надежности* – совокупность координируемых действий, являющихся частью СУН и ориентированных на достижение, поддержание и подтверждение требуемого уровня надежности изделий.

*Программа обеспечения надежности (ПОН)* – документ, устанавливающий комплекс взаимоувязанных организационных и технических мероприятий, методов, средств, требований и норм, направленных на выполнение установленных в документации на изделие (объект СУН) требований к надежности.

#### Общие положения

СУН разрабатывают и реализуют на предприятии. Основной целью СУН является своевременное и эффективное решение проблем, связанных с надежностью изделий.

СУН должна обеспечивать решение следующих задач:

- обоснование необходимого уровня надежности изделий с учетом требований рынка и возможностей предприятия;
- достижение необходимого уровня надежности изделий;
- подтверждение достигнутой надежности изделий;
- обеспечение надежности изделий;
- улучшение надежности изделий.

СУН является частью общей системы управления предприятием и частью его системы качества.

В зависимости от масштаба и характера деятельности предприятия функции СУН реализуют в виде самостоятельной организационной структуры (подразделения надежности), подчиненной непосредственно руководству предприятия, либо в рамках соответствующего подразделения службы качества предприятия, либо в виде должностных обязанностей отдельных лиц.

Создание, функционирование и совершенствование СУН должны базироваться на следующих принципах:

- приоритетность требований рынка;
- комплексный характер решений с учетом факторов качества, безопасности, охраны окружающей среды, ресурсосбережения и пр.;
- распределение ответственности;
- своевременное выявление и предупреждение возникающих проблем;
- управление изменениями;
- обеспечение необходимыми ресурсами;
- единое понимание задач персоналом;
- стимулирование персонала;
- контроль исполнения;
- документальное оформление результатов работ всех видов.

В общем случае СУН включает в себя:

- постоянные элементы, определяющие общую готовность предприятия к обеспечению надежности и используемые при управлении надежностью любых изделий (объектов СУН);

- элементы СУН конкретных изделий.

Постоянными элементами СУН являются следующие:

- организационная структура (например подразделение надежности предприятия) и распределение ответственности;

- персонал;
- материально-технические ресурсы;
- нормативная документация и методическое обеспечение;
- техническое обслуживание и ремонт;
- информационное обеспечение;
- программное обеспечение;
- документация и отчетность;
- подготовка специалистов и повышение их квалификации;
- требования и ограничения ко всем факторам, определяющим возможности СУН.

Постоянные элементы СУН включают в "Руководство по качеству" в виде самостоятельного раздела или оформляют в виде отдельных докумен-



тов: "Руководство по СУН" и/или "Положение о подразделении надежности предприятия".

Элементы СУН конкретных изделий устанавливают в ПОН на соответствующих стадиях их жизненного цикла (ПОН<sub>р</sub> – на стадии разработки, ПОН<sub>п</sub> – на стадии производства, ПОН<sub>э</sub> – на стадии эксплуатации).

СУН постоянно (периодически) совершенствуют с целью адаптации к уточненным требованиям, новым научным и техническим решениям, изменяющимся условиям деятельности, рынка и др.

### Основные требования к системе управления надежностью и ответственность руководства

Мероприятия по управлению надежностью на предприятии включают в себя:

- формирование технической политики;
- определение конкретных целей управления надежностью на стадиях жизненного цикла изделий;
- определение состава работ;
- планирование работ;
- определение ответственности, полномочий, состава и порядка действий и взаимодействий подразделений и персонала предприятия;
- разработку ПОН по конкретным изделиям;
- обеспечение необходимого уровня квалификации персонала;
- определение порядка взаимодействия с потребителями, поставщиками, соисполнителями и другими организациями;
- распределение ресурсов;
- фактическую реализацию запланированных действий по управлению надежностью;
- оптимизацию затрат и снижение стоимости работ;
- установление критериев, методов прогнозирования, оценки и контроля надежности с учетом требований соответствующих действующих документов;
- установление критериев и оценок эффективности СУН и ее элементов;
- анализ, контроль и оценку эффективности СУН;
- совершенствование и корректировку СУН;
- повышение квалификации, стимулирование и мотивацию персонала предприятия, участвующего в деятельности по управлению надежностью.

Руководство предприятия разрабатывает и документально оформляет общую техническую политику в области надежности, в которой отражает цели, задачи, обязательства и принципы деятельности предприятия на текущий момент и на перспективу. В формировании технической политики

должны принимать участие руководители предприятия, осуществляющие его управление на высшем уровне. С технической политикой должен быть ознакомлен весь персонал предприятия. На предприятии должны проводиться мероприятия, обеспечивающие понимание, поддержку и реализацию технической политики персоналом. Положения технической политики должны своевременно уточняться и корректироваться руководством предприятия.

Непосредственное руководство СУН осуществляет должностное лицо, назначенное руководством предприятия, несущее ответственность и располагающее полномочиями для осуществления этой деятельности. По решению руководства эти обязанности могут быть возложены на руководителя службы качества предприятия.

Основными функциями руководителя СУН являются:

- разработка, внедрение и поддержание СУН в рабочем состоянии;
- обеспечение реализации конкретных элементов и задач СУН;
- взаимодействие с потребителями, соисполнителями, поставщиками, вышестоящей организацией, органами исполнительной власти;
- обоснование видов и объемов ресурсов, необходимых для обеспечения функционирования СУН;
- представление руководству отчетов о результатах функционирования СУН с предложениями по улучшению деятельности и управления в области надежности.

На предприятии должно быть создано или определено подразделение, на которое возлагаются функции по управлению надежностью. Состав и структуру подразделения определяют исходя из возлагаемых на него задач и объемов работ.

СУН, наряду с соответствующей системой управления качеством, регулярно проверяют (оценивают) на предмет ее пригодности, адекватности и эффективности. Проверку проводит руководство предприятия или уполномоченный представитель руководства. Решения и действия, принимаемые по результатам проверки (оценки) адекватности и эффективности СУН, должны быть запротоколированы. В отчетах приводятся рекомендации по улучшению управления надежностью и предлагаемые изменения СУН.

Предприятие должно определить и выделить ресурсы, необходимые для реализации СУН, ее поддержания и улучшения.

## Взаимодействие руководства предприятия с потребителем и соисполнителями

Руководство предприятия гарантирует и предоставляет документальные доказательства того, что запросы и ожидания в области надежности непосредственного потребителя выявлены, определены в виде конкретных требований и согласованы. Руководство предприятия обеспечивает полное и точное выполнение требований потребителя и единое понимание проблем надежности.

На предприятии должен быть установлен и документально оформлен порядок взаимодействия со сторонними исполнителями работ (услуг), поставщиками комплектующих изделий, материалов и сырья. При взаимодействии с соисполнителями и поставщиками следует:

- оценивать возможности исполнителей и поставщиков в части надежности поставляемых комплектующих изделий, материалов, услуг;
- проводить анализ контрактов (договоров) с клиентами, соисполнителями, поставщиками комплектующих изделий в части требований к надежности и правильности их задания;
- проверять, по возможности, функционирование СУН соисполнителей и поставщиков.

### Планирование системы управления надежностью

Планирование СУН осуществляет руководство предприятия в виде программных и плановых документов. При планировании СУН и мероприятий по обеспечению и улучшению надежности конкретных изделий (объектов СУН) на всех стадиях их жизненного цикла учитывают основные положения политики предприятия в области надежности, а также мероприятия, планируемые в области управления качеством.

Основным программным документом является ПОН конкретного изделия для соответствующей стадии его жизненного цикла.

Другими программными и плановыми документами могут быть программы и планы повышения (улучшения) надежности, отработки на надежность, испытаний на надежность.

Программные и плановые документы должны быть взаимоувязаны между собой, в том числе по срокам, и должны включать в себя контрольные точки, обеспечивающие возможность оценки выполнения требований программных и плановых документов, а также перечень отчетных документов, в том числе мероприятия по реализации результатов проверок.

В СУН должны быть определены и документально оформлены ответственность, структура и порядок взаимодействия подразделений и персонала предприятия, участвующих в реализации СУН.

Особое внимание следует уделить установлению ответственности и предоставлению организационной свободы и полномочий персоналу, осуществляющему:

- проведение мероприятий, направленных на предупреждение отказов и факторов, отрицательно влияющих на надежность изделий;
- анализ отказов (неисправностей) изделий и причин их возникновения;
- выработку рекомендаций или решений по доработке изделий с целью устранения выявленных причин, факторов, отклонений и несоответствий;
- контроль доработки изделий и проверку выполнения решений.

Персонал, выполняющий конкретные действия по управлению надежностью, должен иметь соответствующие образование, квалификацию и опыт работы.

Руководство предприятия устанавливает и доводит до персонала СУН критерии оценки деятельности, периодически анализирует результаты деятельности, оценивает вклад отдельных сотрудников и стимулирует их дальнейшую деятельность.

На предприятии должны быть разработаны, документально оформлены и периодически проводиться процедуры подготовки (обучение, повышение квалификации, аттестация, стажировка и т.д.) персонала, выполняющего работы в рамках СУН, а также оценка эффективности подготовки.

#### Обеспечение надежности на стадиях жизненного цикла изделия

Обеспечение надежности конкретного изделия (объекта СУН) осуществляют путем реализации заданий согласно разработанной ПОН на соответствующих стадиях его жизненного цикла.

Мероприятия, предусмотренные ПОН на одной стадии, должны быть взаимосвязаны с мероприятиями, предусмотренными ПОН на других стадиях, а также с текущей деятельностью предприятия, в частности с ограничениями ресурсов различного вида.

Все проблемы обеспечения надежности, влияющие на последующие стадии жизненного цикла изделия, в ходе реализации ПОН должны быть как можно раньше выявлены, решены и документально оформлены.

По возможности и там, где это допустимо, при реализации ПОН необходимо оценивать риск невыполнения требований к надежности изделий (объектов СУН) или превышения ограничений затрат на обеспечение надежности, проводить анализ риска и управлять риском с целью обеспечения требуемой надежности в пределах установленных ограничений затрат на протяжении всех стадий жизненного цикла изделий.

## Анализ данных о надежности

Анализ данных проводят с целью:

- оценки надежности изделий по результатам их испытаний и эксплуатации;
- выявления повышения (изменения) надежности изделий;
- обеспечения надежности новых видов изделий;
- выявления необходимости улучшения правил эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, комплектации и снабжения запасным имуществом, инструментами и принадлежностями (ЗИП);
- выявления влияния условий и режимов эксплуатации на надежность;
- идентификации видов, причин и возможных механизмов возникновения отказов (неисправностей);
- совершенствования баз данных и методов прогнозирования;
- получения информации, необходимой при выполнении функций управления надежностью.

Источниками данных о надежности изделий являются:

- отчеты о результатах расследований аварий и катастроф;
- акты рекламаций;
- результаты входного контроля качества комплектующих изделий, полуфабрикатов и материалов;
- результаты различных видов технологического контроля в процессе производства;
- результаты приемочных испытаний опытных образцов изделий;
- результаты приемосдаточных испытаний серийных образцов изделий;
- информация, полученная в процессе авторского надзора;
- информация, полученная в процессе гарантийного обслуживания и ремонта;
- информация, полученная в процессе подконтрольной эксплуатации (эксплуатационных испытаний) отдельных образцов (групп) изделий;
- информация о материально-техническом обеспечении и запасах.

На каждой стадии жизненного цикла изделия предприятие должно осуществлять сбор, анализ и обработку данных по согласованным методикам обработки данных и критериям оценки полученных результатов. Результаты анализа оформляют документально и используют при выработке управленческих решений.

## Нормативное обеспечение системы управления надежностью

Нормативное обеспечение СУН – это комплекс взаимосвязанных мероприятий, проводимых предприятием и направленных на формирование, своевременное обновление и использование фонда нормативных документов, обеспечивающих функционирование СУН.

Фонд нормативных документов СУН представляет собой совокупность стандартов предприятий (организаций), руководств, инструкций, положений, программ и других документов, в которых устанавливают требования к СУН и ее элементам, правила и методы, позволяющие на каждой стадии жизненного цикла изделия реализовывать требования СУН, ТЗ, контракта.

Фонд нормативных документов СУН должен обеспечивать единое понимание всем персоналом предприятия технической политики в области надежности, элементов и задач СУН на соответствующих стадиях жизненного цикла изделия.

Основным документом СУН на предприятии является "Руководство по СУН". В нем содержится общее описание СУН, техническая политика в области надежности, принципы построения СУН, ее организационная структура, сведения о документах всех уровней, составляющих нормативно-методическую базу СУН, порядок внедрения, функционирования и контроля СУН.

Документом СУН также является "Положение о подразделении надежности предприятия" (при наличии такого подразделения), в котором устанавливают задачи и функции подразделения и должностные инструкции сотрудников.

Для других подразделений и служб предприятия, участвующих в решении совместных задач по управлению надежностью, определяют дополнительные функции, полномочия и ответственность их руководителей и исполнителей, что отражают в соответствующих положениях о структурных подразделениях и должностных инструкциях, действующих на предприятии.

В документах, касающихся надежности изделий (технические задания, договоры, контракты, ПОН, технические условия, отчеты, базы данных), указывают конкретные стандарты и отдельные требования стандартов, применение которых предусмотрено при выполнении видов (этапов) работ на соответствующих стадиях жизненного цикла.

При нормативном обеспечении СУН используют:

- межгосударственные и национальные стандарты системы "Надежность в технике";
- межгосударственные и национальные стандарты на виды техники в части, касающейся аспектов надежности;
- стандарты предприятий (организаций) по СУН.

## 5.2. Программа обеспечения надежности

Организационно-технической основой для создания объектов, удовлетворяющих заданным требованиям по надежности, служит программа обеспечения надежности.

Программа обеспечения надежности (ПОН) – документ, устанавливающий комплекс взаимосвязанных требований и мероприятий, направленных на обеспечение требуемого (заданного) уровня надежности изделий в процессе разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации. Программа должна охватывать все или отдельные стадии жизненного цикла объекта.

Программа обеспечения надежности включает, в частности, программу экспериментальной обработки, которая определяет цели, задачи, порядок проведения и необходимый объем испытаний или экспериментальной отработки, а также регламентирует порядок подтверждения показателей надежности на стадии разработки. Программа обеспечения ремонтпригодности устанавливает комплекс взаимосвязанных организационно-технических требований и мероприятий, направленных на обеспечение заданных требований по ремонтпригодности и (или) повышение ремонтпригодности. Она разрабатывается одновременно с программой обеспечения надежности и является либо ее составной частью, либо самостоятельной программой.

#### Правила разработки программы обеспечения надежности

ПОН может быть индивидуальной (на один тип изделия), групповой (на группу изделий или ряд), а также на технологический процесс. Она может распространяться на отрасль, подотрасль, производственное (научно-производственное) объединение, предприятие, цех, участок.

ПОН может разрабатываться в виде единого документа или в виде отдельных документов на стадиях разработки (ПОНр), производства (ПОНп) и эксплуатации (ПОНэ).

В ПОН должны быть установлены:

- перечень конкретных мероприятий по обеспечению надежности изделий с указанием этапов и видов работ на соответствующей стадии жизненного цикла;
- ответственный исполнитель, исполнители и сроки выполнения каждого мероприятия;
- нормативно-технические и методические документы, которые следует использовать при выполнении указанных мероприятий;
- отчетные документы, отражающие результаты выполнения мероприятий;
- контрольные этапы, после завершения которых проводят оценку достигнутого уровня надежности изделия и рассматривают мероприятия по корректировке ПОН;
- порядок контроля реализации и корректировки ПОН.

По составу и срокам планируемых мероприятий ПОН должна быть увязана с проводимыми на соответствующей стадии жизненного цикла изделия работами по обеспечению качества.

ПОН составных частей должны быть увязаны с ПОН изделия в целом.

ПОН разрабатывают для вновь создаваемых (модернизируемых) изделий и для серийных изделий, изготавливаемых по технической документации, утвержденной в установленном порядке. Разработка ПОН проводится на основании технического задания на изделие на стадии технического предложения или эскизного проекта.

ПОН разрабатывает подразделение главного конструктора изделия (для технологических процессов – подразделение главного технолога) с участием подразделений надежности, стандартизации, ОТК и других заинтересованных подразделений и, при необходимости, согласовывается с заказчиком.

Если разработчик изделия не является изготовителем, то ПОН согласуется с последним.

ПОН утверждается руководителем предприятия (организации) разработчика.

### Типовая структура ПОН

Структура программы обеспечения надежности должна предусматривать:

➤ *на этапе технического задания, технического предложения, эскизного проекта:*

- сбор и анализ информации о надежности аналогов, их составных частей, комплектующих элементов;
- определение критериев отказов;
- выбор и обоснование номенклатуры и норм показателей надежности;
- распределение (задание) норм надежности на составные части, подсистемы, комплексы, сборочные единицы, узлы, детали, комплектующие элементы;
- выбор материалов и комплектующих изделий;
- разработку предложений по обеспечению надежности составных частей, по защите изделий от перегрузок (механических, электрических, климатических и др.);
- разработку предложений по обеспечению требований безопасности;
- оценку надежности выбранного варианта конструкции изделий (эта работа выполняется постоянно по мере разработки изделия, уточнения структуры и конструкторских решений составных частей, получения результатов исследований и испытаний, уточнения информации о надежности комплектующих элементов и др.);



- оценку и анализ надежности составных частей, технологических процессов, определения норм расхода запасных частей, планов испытаний, допустимых нагрузок, допусков;
- разработку ограничительных перечней на комплектующие элементы, детали, материалы, технологические операции и др.;
- расчет надежности по параметрам прочности, износостойкости и других видов разрушений;
- разработку методик по проведению испытаний всех видов;
  - *на этапе технического проекта:*
- уточнение всех расчетов, сделанных в эскизном проекте, с учетом принятых решений по структуре и конструкции изделия, результатов исследования и испытаний макетов, образцов, комплектующих изделий, элементов конструкции и других уточненных данных по надежности составных частей; уточнение нагрузок, допусков и др.;
- испытание макетов, предварительную оценку надежности изделия и его составных частей;
- анализ причин отказов, обнаруженных при испытаниях макетов, уточнение критериев отказов и предельных состояний;
  - *на этапе разработки конструкторской документации:*
- внесение требований по надежности в конструкторскую документацию;
- разработку подраздела „Критерии отказов и предельных состояний“;
- разработку методов оценки надежности по результатам испытаний;
- разработку программы и методики испытаний по надежности;
- проработку вопросов повышения надежности изделий путем унификации и стандартизации комплектующих элементов;
- разработку конструкторской документации на консервацию, упаковку и транспортирование изделий;
- расчет ЗИП для обеспечения требуемой восстанавливаемости изделий;
- разработку эксплуатационной и ремонтной документации;
- корректировку конструкторских документов по результатам испытаний всех видов, по результатам изготовления;
- *на этапе изготовления изделия:*
- оценку готовности предприятия к выпуску продукции с регламентированными требованиями к надежности;
- аттестацию технологических процессов;
- использование передовых методов организации производства и труда;
- автоматизацию и механизацию технологических процессов;

- внедрение гибких производственных систем и робототехнических комплексов;
- внедрение автоматизированных систем управления;
- повышение точности и стабильности технологических процессов;
- автоматизацию пооперационного контроля;
- входной контроль комплектующих изделий, сырья и материалов;
- сертификацию изделий, технологических процессов, методов испытаний;
- реализацию мероприятий по повышению надежности технологических процессов;
- внедрение неразрушающих методов контроля;
- контрольные испытания с моделированием условий эксплуатации;
- ускоренные контрольные испытания;
- технологический прогон и обкатку;
- обеспечение технологической дисциплины;
- аттестацию рабочих мест;
- обеспечение промышленной чистоты;
- соблюдение правил консервации и упаковки готовых изделий;
- совершенствование конструкторской и технологической документации;
- *на этапе эксплуатации изделий:*
- сбор и обработку информации о надежности изделий при эксплуатации;
- анализ причин отказов, возникающих при эксплуатации, разработку мероприятий по их устранению;
- анализ эффективности системы технического обслуживания и ремонта;
- оценку достаточности ЗИП;
- мероприятия по автоматизированному контролю эксплуатационных параметров;
- внедрение средств технической диагностики;
- внедрение промышленных методов ремонта;
- регулярное техническое обслуживание;
- внедрение систем ремонта по фактической потребности;
- внедрение фирменного ремонта;
- совершенствование ремонтной и эксплуатационной документации;
- восстановление изношенных деталей;
- мероприятия по повышению надежности заданных частей;
- мероприятия по соблюдению правил и режимов эксплуатации;
- обучение обслуживающего персонала;
- мероприятия по хранению и консервации изделий;
- мероприятия по модернизации техники.

ПОН должна быть оформлена, согласована и утверждена в соответствии с действующими в отрасли требованиями. Если требования к оформлению ПОН не установлены, то ее рекомендуется оформлять по форме, представленной ниже.

### **Программа обеспечения надежности**

Наименование изделия:					
Этапы	Мероприятия по обеспечению	Сроки выполнения		Исполнители	Чем заканчивается мероприятие? Отчетный документ
		Начало	Окончание		

### **5.3. Задание технических требований к надежности**

Для многих систем необходимо, чтобы характеристики их надежности (безотказность, ремонтпригодность и др.) были определены и конкретизированы, так же, как и другие характеристики систем, такие, как технические характеристики, размеры, масса и др.

Уровни надежности системы зависят от ее назначения и условий, в которых она работает. Вместе с требованиями к надежности необходимо определить условия хранения, транспортирования, монтажа и эксплуатации, а также стратегию технического обслуживания и организацию его поддержки.

Для оценки значений достигнутых характеристик надежности необходимо использовать статистические методы.

Характеристики надежности, как и другие рабочие характеристики, могут быть установлены техническими условиями:

- подготовленными поставщиком;
- выдвинутыми потребителем;
- взаимно согласованными поставщиком и потребителем.

#### **Потребность в надежности**

Все системы характеризуются определенным уровнем надежности, при этом возможны их отказы и/или необходимо их обслуживание. Если отказы системы возникают слишком часто, то либо она не сможет выполнять требуемые функции, либо устранение этих отказов (ремонт) может стоить слишком дорого. Кроме того, при частых отказах система получает низкую оценку потребителя и вряд ли будет приобретена снова, когда потребуется ее замена. С другой стороны, проектирование и производство систем с высоким уровнем безотказности могут быть дорогостоящими, и производить такие системы по экономическим причинам будет нецелесообразно. Таким образом, существует устойчивое равновесие между

системами с низким уровнем безотказности, ремонт которых стоит дорого, и системами с высоким уровнем безотказности, которые могут быть дорогими с точки зрения разработки и производства. На рис. 5.1 показаны затраты на разработку и эксплуатацию систем с различным уровнем безотказности.

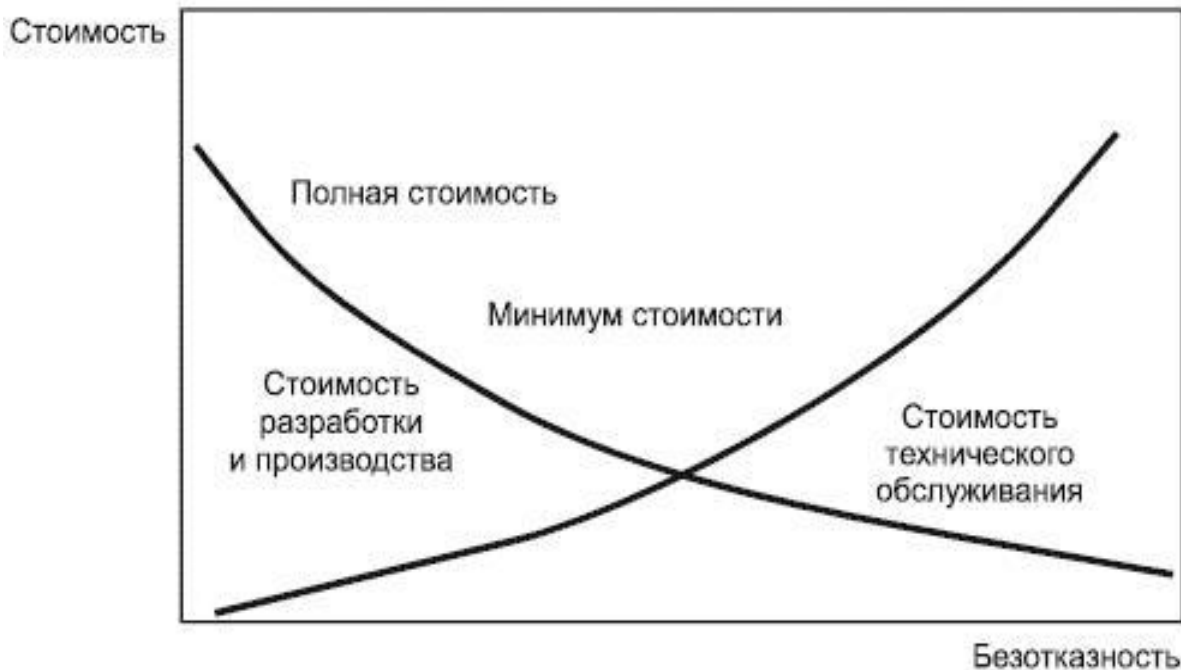


Рис. 5.1. Зависимость стоимости системы от ее безотказности

Из рис. 5.1 видно, что существует уровень безотказности, для которого расходы в течение всего жизненного цикла системы сведены к минимуму.

На оптимальную безотказность системы могут влиять и другие аспекты, такие, как требования к безопасности.

При задании технических требований к надежности в соответствии с ГОСТ Р 27.003–2011 рассматриваются следующие показатели надежности:

- показатель готовности – коэффициент готовности;
- показатели безотказности: вероятность безотказной работы  $P(t)$ , средняя наработка до отказа (MTTF), средняя наработка между отказами (MTBF);
- показатели ремонтпригодности, в том числе среднее время простоя (MDT) и среднее время до восстановления (MTTR);
- поддержка технического обслуживания.

Показатели надежности системы, выбираемые для спецификаций, должны быть связаны с видом и назначением системы, предусмотренными применением и важностью требуемых функций.

Требования к обеспечению эксплуатационной готовности задают для систем, неработоспособное состояние которых может привести к экономическим потерям, увеличению эксплуатационных расходов, опасности

для жизни и здоровья людей или невыполнению задания или услуги, т.е. для больших систем, промышленных предприятий, медицинского оборудования, систем безопасности и военных систем. Показатель обеспечения эксплуатационной готовности рассчитывают с учетом конфигурации системы и ее подсистем, требований к их показателям безотказности и ремонтпригодности и эффективности средств технического обслуживания.

Требования к характеристикам ремонтпригодности задают для систем, если расходы на техническое обслуживание вносят существенный вклад в стоимость на протяжении жизненного цикла или если техническое обслуживание имеет большое значение для потребителя. Могут быть определены требования к профилактическому и корректирующему техническому обслуживанию.

Уровень технического обслуживания часто определяется условиями эксплуатации и является требованием к системе применительно к заданным условиям эксплуатации.

На уровень свойств надежности системы в большой степени влияют условия, в которых она спроектирована, разработана, установлена и эксплуатируется. Таким образом, надежность связана с другими показателями, такими, как качество и процессы разработки и производства. Поэтому характеристики надежности должны быть частью общих спецификаций системы, и взаимодействие между различными показателями и условиями должно быть учтено и установлено.

Спецификации по надежности относятся к системе, которая включает в себя оборудование, людей, которые эксплуатируют и обслуживают систему, а также среду, в которой она работает.

По возможности все элементы системы должны быть включены в спецификацию, поскольку изменение любого из них может оказать существенное влияние на надежность системы. Например, разные пользователи системы могут неправильно или небрежно обращаться с ней, что приведет к увеличению отказов и к снижению уровня безотказности. Возможны случаи, когда поставщик и потребитель могут слабо, совсем не могут или не имеют опыта управления техническим обслуживанием системы, например проданного (приобретенного) автомобиля. Требования к надежности должны учитывать конкретные обстоятельства эксплуатации системы.

Наряду с требованиями к техническим средствам спецификации должны содержать требования и к человеческому фактору.

Многоуровневая система может состоять из систем и подсистем. Это предусматривает рассмотрение взаимодействия людей, которые работают с подсистемами, их действий и способности различных людей подвергать подсистемы различным эксплуатационным нагрузкам. Например, различные водители управляют автомобилем по-разному и подвергают коробку передач большим или меньшим нагрузкам.

Потребитель может выбирать, установить требования к надежности только на самом высоком уровне системы или также установить требования на более низком уровне. Эти требования к надежности более низкого уровня не должны противоречить требованиям высшего уровня и быть измеримыми и достижимыми. Например, вклад подсистемы в общую надежность системы должен быть оценен прежде, чем требования будут распределены по подсистемам.

К восстанавливаемым системам относят те, которые могут быть восстановлены после отказов и могут быть возвращены в рабочее состояние. К невосстанавливаемым системам относят герметичные системы, системы, стоимость ремонта которых превышает стоимость замены, в частности многие потребительские товары.

Невосстанавливаемые системы заменяют, а не ремонтируют, и требования к ремонтпригодности и техническому обслуживанию будут принципиально разными.

### Демонстрация выполнения требований

Любой спецификации присущи два элемента: требования к надежности и средства, с помощью которых поставщик должен продемонстрировать достижение требований потребителю, то есть поставщик должен предоставить достаточные доказательства потребителю, что система отвечает его требованиям, чтобы стимулировать потребителя к приобретению системы. Предоставление дополнительных доказательств требует дополнительных затрат, но без учета этого фактора существует опасность несоответствия системы требованиям.

Демонстрация включает в себя два основных элемента: верификацию и валидацию. Они определены в ГОСТ Р ИСО 9000, используются для систем и программного обеспечения. Верификация представляет собой процесс предоставления доказательств соответствия системы заданным требованиям, а валидация – это процесс предоставления доказательств соответствия системы требованиям конкретного внешнего потребителя или пользователя системы, которые не всегда могут быть отражены в спецификации.

Уровни верификации и валидации устанавливает потребитель. Предоставление доказательств требует затрат, и потребитель принимает сбалансированное решение о приемлемых рисках при указании требований верификации и валидации.

Верификация и валидация должны быть запланированы и проводиться систематически. Требования надежности учитывают различные факторы, которые могут повлиять на стоимость верификации и валидации.

Для долгосрочных закупок деятельность по верификации и валидации может быть запланирована на длительный срок в зависимости от условий

договора. Один из способов уменьшить проектные риски покупателя и поставщика и обеспечить уровень требуемых доказательств состоит в постепенном проведении верификации и валидации. Это означает, что мероприятия запланированы на протяжении всего жизненного цикла и результаты предоставляются покупателю в отдельных точках реализации проекта. Таким образом, покупатель обретает уверенность на протяжении всего проекта в снижении риска недостаточности уровня доказательств.

#### Мероприятия верификации и валидации

Верификация и валидация охватывают ряд мероприятий, призванных обеспечить доказательства соответствия системы требованиям к уровню надежности.

Если потребитель требует проведения верификации и валидации, поставщик должен определить соответствующие способы. Например, спецификации могут не требовать проведения анализа дерева отказов (FTA), но могут предусматривать анализ для определения комбинации событий, которые могут привести к отказу системы, на основе блок-схемы безотказности. Метод реализации деятельности выбирает поставщик по своему усмотрению с учетом, например, таких факторов, как опыт специалиста-аналитика, располагающего временем, данными и информацией. Например, выполнение анализа блок-схемы безотказности опытным специалистом может быть предпочтительнее FTA, выполненного неопытным специалистом.

Мероприятия верификации и валидации включают в себя:

а) анализ:

- соблюдение стандартов, правил и руководящих принципов;
- экспертный обзор передовой практики сертификации;
- расчеты, используемые для других целей конструкции (например, анализ предельных нагрузок элементов, износа);
- моделирование (например, свойств системы);
- различные виды анализа надежности;

б) испытания и демонстрацию:

- работу идентичных или подобных систем в идентичных или схожих условиях;
  - специализированные испытания на надежность, в том числе:
  - демонстрационные испытания на безотказность, например одноступенчатые испытания, последовательные испытания, ускоренные испытания или испытания на долговечность;
  - демонстрационные испытания готовности;
  - демонстрационные испытания ремонтпригодности;
- в) другие испытания, проводимые в ходе опытно-конструкторских работ (например, на производительность, долговечность).

Прогнозирование надежности и результаты анализа, представленные во время разработки, менее точны, чем результаты, полученные в ходе испытаний. Поэтому потребитель, вероятно, не захочет опираться только на результаты анализа и может потребовать сочетания анализа и испытаний для доказательства выполнения требований. Кроме того, при планировании испытаний должны быть приняты во внимание окружающая среда и использование системы. В случаях, когда условия испытаний близки к условиям эксплуатации, такие испытания дают хорошую оценку надежности, но они могут длиться очень долго и иметь малое число отказов, что приведет к большой неопределенности в оценке надежности. Если использовать ускоренные испытания, то размер выборки будет увеличен, а время испытания – сокращено. Большее число отказов будет уменьшать статистическую неопределенность, но техническая неопределенность будет выше, так как условия ускоренных испытаний могут привести к появлению режимов и отказов, не связанных с эксплуатационными условиями.

### Заключение контрактов в части надежности

Спецификация обычно является частью договора между потребителем и поставщиком, и поэтому важно, чтобы она была написана в виде, удобном для заключения договоров. Успешное завершение демонстрационных испытаний зависит от поэтапных выплат с использованием как штрафных санкций, так и стимулов достигнутой штатной безотказности.

Важно проводить различие между требованиями, которые детализируют, как система должна работать, и письменными спецификациями, в которых детализируют, что система содержит. В зависимости от вида системы могут быть разных уровней сложности и могут быть выполнены потребителем или поставщиком.

При написании положений надежности для контрактов особое внимание уделяется тому, что положения должны иметь смысл и быть реализуемыми. Например, указание в договоре для устройства одноразового использования требования вероятности безотказной работы 99,5% при доверительной вероятности 80% потребует минимум 322 испытаний, что при приобретаемой партии в 50 устройств является явно нереалистичным требованием, и потребитель должен найти альтернативные методы достижения необходимой верификации и валидации, например путем использования более низких уровней безотказности, для которых доказательство может быть предоставлено вместе с дополнительным анализом или моделированием.

Выбор действий верификации и валидации, включаемых в контракт, зависит от уровня проектного риска, который потребитель может принять. Если потребитель согласен рисковать, что система может быть неисправной, но будет обслуживаться поставщиком, то использование штрафов



за плохую работу и стимулов повышения требований могло бы быть лучшим методом. Если, однако, потребитель не желает рисковать неготовностью системы, то формальное тестирование безотказности или готовности может быть необходимым.

Преимущества каждого подхода заключаются в следующем:

а) штрафы за плохую работу будут стимулировать поставщиков уделить максимальное внимание надежности, что может привести к ее более высокому уровню;

б) демонстрационное испытание является дорогостоящим и трудоемким и может только выявить в начале эксплуатации несоответствие требованиям надежности;

в) техническое обслуживание, обеспечиваемое поставщиком, требует намного более длительного контракта, например соглашения о техническом обслуживании при фиксированных расходах и связанных с этим трудностях, при этом поставщик рискует, что система не достигнет требуемой безотказности.

Если спецификации надежности будут использоваться в качестве основы для заключения договоров, важно, чтобы спецификации были точными, с тем чтобы предотвратить разногласия в контракте.

Примеры видов элементов, которые должны быть включены в спецификацию для заключения договоров:

- точные и четко определенные критерии, по которым могут быть оценены готовность, безотказность, ремонтпригодность или поддержка технического обслуживания;

- обязанности и ответственность потребителя, поставщика и любых третьих лиц;

- рассматриваемая система, оборудование или сборка, на которые заданы соответствующие требования;

- функция системы;

- различные эксплуатационные и экологические условия, при которых используется система, в том числе, по возможности, относительное количество времени, проведенное в каждом состоянии;

- определение отказа или критерии отказа (полного, частичного или снижения производительности);

- как система будет устанавливаться и использоваться;

- квалификация и обязанности персонала, ответственного за эксплуатацию и поддержку технического обслуживания оборудования, программного обеспечения и документации;

- политика поддержки технического обслуживания и соответствующие процедуры и механизмы поддержки;

- методы, предназначенные для применения верификации и валидации соответствия требованиям, в том числе критерий "принять/отклонить";

- источники данных, которые будут использоваться в любых аналитических методах.

В целях снижения числа отказов и времени неработоспособного состояния системы необходимо сотрудничество поставщика и потребителя на всех стадиях жизненного цикла системы. Это определяет различные обязательства со стороны как потребителя, так и поставщика, которые должны быть указаны.

### Виды спецификаций

На характер поставляемой системы фундаментальное влияние оказывает то, кем написаны спецификации. Существуют три основных способа:

- спецификации, написанные поставщиком; в основном используются для систем, которые должны иметь определенные характеристики надежности, например вероятность безотказной работы, чтобы быть принятыми на рынке;

- спецификации, написанные покупателем; в основном используются для стандартных систем, которые должны отвечать определенным характеристикам надежности в целях удовлетворения потребностей покупателя;

- спецификации, взаимно согласованные или написанные поставщиком и покупателем; обычно используются в случае систем, сделанных на заказ, или изменений в действующей конструкции.

Если в ходе реализации проекта становится очевидным, что основные предположения или требования придется пересмотреть и изменить, то соответственно необходимо изменить и спецификации, причем это следует сделать с согласия всех заинтересованных сторон.

Количественные требования должны быть четко определены в форме, предоставляющей возможность сопоставления с результатами, полученными впоследствии.

Если доказательства соответствия количественных требований предоставляются путем испытаний, должен быть указан необходимый уровень достоверности или фактический план испытаний, который будет использован.

Планы испытаний различных видов для демонстрации показателей безотказности приведены в ГОСТ Р 27.402 и ГОСТ Р 27.403.

### Источники для спецификаций

Требования безотказности, ремонтпригодности и готовности в спецификациях всюду, где это возможно, должны быть выражены количественно, но также может быть уместным определение качественных требований. Количественные требования имеют смысл, когда они могут быть измерены в процессе верификации и валидации. Если требование не может быть

измерено в процессе предоставления свидетельства, то оно является целью, и обоснование предоставленного свидетельства должно обеспечивать качественные требования.

Данные для спецификаций содержатся в ряде источников, включая:

- а) собственные данные поставщика по техническому обслуживанию и услугам;
- б) общие базы данных и справочники;
- в) данные изготовителя по подсистемам и компонентам.

Поскольку требования надежности связаны с безопасностью и окружающей средой, соответствующие требования безопасности и окружающей среды должны быть включены в требования к надежности, или должны быть даны соответствующие ссылки.

## 5.4. Управление надежностью

В спецификации может описываться одно или больше свойств: готовности, безотказности, ремонтпригодности и поддержки технического обслуживания. Эти характеристики являются внутренними характеристиками системы, и действия по верификации и валидации могут отражать возможные результаты. Однако другие факторы могут значительно уменьшить достигнутые уровни этих величин ниже предусмотренных уровней. Потенциально самым существенным является качество изготовления и обслуживания системы, которое может вносить дополнительные отказы в систему. Поэтому важно активно управлять надежностью на всех стадиях жизненного цикла системы, включая процесс приобретения и период использования. Необходимые действия по управлению будут различны на каждой стадии. Если надежностью правильно не управлять в процессе приобретения или во время использования, то повышается вероятность того, что требования к свойствам безотказности или готовности не будут достигнуты.

Основные положения по системе управления надежностью даны в ГОСТ Р 27.001.

### Готовность

#### Выбор характеристики надежности

Для некоторых систем, особенно сложных, необходимо рассмотреть безотказность, ремонтпригодность и обслуживание в рамках единого процесса. В таких системах уместно на уровне системы определить требования к готовности, а не отдельные требования к безотказности и ремонтпригодности. Потребитель определяет, какой из видов готовности его интересует или каков риск недостижения необходимого уровня свойства

готовности. Обычно применяют стационарный коэффициент готовности, но может использоваться средний коэффициент готовности.

Определения показателей готовности даны в ГОСТ Р 27.002.

Соотношения между готовностью, безотказностью и ремонтпригодностью

Показатели готовности, безотказности и ремонтпригодности являются зависимыми величинами. Связь между ними дана в определениях соответствующих терминов в ГОСТ Р 27.002.

Обычно определяют две из трех величин, чтобы гарантировать, что соотношение между продолжительностями работоспособного и неработоспособного состояний является приемлемым. Одно и то же значение коэффициента готовности может быть достигнуто с большими значениями продолжительности работоспособных и неработоспособных состояний или с малыми значениями продолжительности этих же состояний. Например, операционные системы персонального компьютера могут отказывать регулярно, но перезагрузка и перезапуск занимают несколько минут, что дает высокое значение коэффициента готовности. Это может не вполне соответствовать ожиданиям пользователя, но может быть более приемлемым, чем то же самое значение коэффициента готовности компьютера, который отказывает нечасто, но недоступен для использования в течение нескольких дней после отказа. В то же время для телекоммуникационных сетей значение коэффициента готовности с малыми значениями продолжительности работоспособных и неработоспособных состояний может быть недопустимым при необходимости бесперебойной передачи больших объемов данных.

### Спецификации готовности

#### Количественные требования

Спецификации готовности задают в виде коэффициента готовности. Следует точно определить, что понимается под коэффициентом готовности, то есть какое время включают в продолжительность неисправного состояния, учтены ли логистические и иные задержки.

Требования к коэффициенту готовности могут быть выражены в виде десятичной дроби или в процентах, например, как средняя продолжительность работоспособного состояния ко времени наблюдения в процентах. Если используют среднее значение коэффициента готовности, то также должен быть указан период времени, за который он измеряется, вместе с другой соответствующей информацией о времени. Например, если требуется среднее значение коэффициента готовности для поездов пригородного сообщения, оно может быть определено как среднее значение коэффициента готовности, измеряемое в течение каждого часа между определенными часами (например, с 7.00 до 10.00 и с 17.00 и до 20.00 с понедельника по пятницу).

При определении количественных требований к коэффициенту готовности обычно суммируют продолжительность неисправного состояния в течение определенного периода времени (например, месяц или год). Если часть времени простоя системы исключается из ответственности поставщика (например, материально-технические или административные задержки), это должно быть указано в спецификации. Структура продолжительности и времени неработоспособного состояния приведена в приложении А ГОСТ Р 27.002.

В табл. 5.1 даны примеры количественных требований к показателям готовности.

Т а б л и ц а 5.1

Требования к готовности

Показатели свойства готовности	Обозначение	Требование
Средний коэффициент готовности	$A(t_1, t_2)$	$\geq 0,9999$
Средний коэффициент неготовности	$U(t_1, t_2)$	$\leq 10^{-4}$
Среднее время неработоспособного состояния	MDT	1 ч

П р и м е ч а н и е . Числовые значения показателей в таблице даны только для того, чтобы проиллюстрировать, как они могут быть заявлены в спецификации. Их не следует рассматривать как стандартизированные значения.

Качественные требования

Качественные требования к готовности могут включать в себя сочетание качественных требований к безотказности и ремонтпригодности, если невозможно использовать количественные требования. Качественные требования к готовности могут дополнять количественные требования, если количественные требования не могут охватить всех аспектов спецификации, например, если продолжительность неисправного состояния является критической при определенных условиях эксплуатации. При этом вид коэффициента готовности и времени, включенные в продолжительность неисправного состояния, должны быть определены в спецификации.

Предоставление верификации и валидации коэффициента готовности

В спецификацию должно быть включено положение о верификации и валидации свойства готовности. Подтверждение готовности часто осуществляют не напрямую, а сочетанием доказательств безотказности и ремонтпригодности.

Верификация и валидация путем проведения испытаний

Если верификацию и валидацию будут осуществлять путем проведения испытаний, могут быть применены стандартизированные процедуры испытаний для стационарного коэффициента эксплуатационной готовности, приведенные в ГОСТ Р 27.404. Следует отметить, однако, что при очень

высоких требованиях к коэффициенту готовности (например, больше 0,999), очень трудно установить конструктивный план испытаний. Верификация и валидация свойства готовности подсистем могут оказать помощь в этом отношении. Это может быть достигнуто с помощью наблюдений за системными и подсистемными уровнями в модели готовности системы. В любом случае возможности методов, применяемых для верификации и валидации требований высокого уровня к коэффициенту готовности, должны быть обоснованы.

#### Верификация и валидация путем анализа

Если верификацию и валидацию будут проводить аналитическими методами, то расчеты должны быть основаны на признанных источниках данных, результатах, полученных благодаря опыту работы на аналогичных системах, изучению эксплуатационных условий, лабораторных испытаний или программно-аппаратной интеграции. Данные должны быть согласованы между поставщиком и потребителем, и источники данных должны быть занесены в спецификацию.

### Безотказность

Для некоторых систем целесообразно указать отдельно требования к безотказности и ремонтпригодности. Безотказность представляет собой способность системы выполнять необходимые функции без отказов в данных условиях в заданном интервале времени. Это свойство наиболее правильно описывается вероятностью безотказной работы. Однако можно определять безотказность за счет использования альтернативных величин, таких, как средняя наработка до отказа или средняя наработка между отказами.

К отраслям, где свойство безотказности может быть основной интересующей характеристикой надежности, относится в числе остальных автомобильная промышленность, когда водитель должен достичь пункта назначения, а необходимость осуществления ремонта может быть отложена до момента прибытия в пункт назначения.

Примером, где средняя наработка до отказа – наилучший показатель безотказности, являются электрические лампочки. Другим примером может быть производственный процесс, когда система постоянно работает и наработка до отказа имеет важное значение для планирования работ по техническому обслуживанию.

Потребитель должен проверить, что соответствующие показатели безотказности определены и требования к используемым статистическим процедурам понятны. Например, если указана вероятность безотказной работы 99% в течение одного года, то это может показаться целесообразным. Однако это значение не следует приравнивать к средней наработке до

отказа 871613 ч (или более 99 лет) в предположении, что интенсивность отказов постоянна.

### Спецификации безотказности

#### Количественные требования

Количественные требования к свойству безотказности необходимо уточнить до начала разработки системы. Для статистического подтверждения показателя безотказности следует указать достоверность, с которой требование должно быть продемонстрировано или установлено.

В первую очередь следует рассмотреть механизм отказов, которому подвергается система, так как это позволит определить, какие из показателей безотказности уместны и целесообразны. Например, двигатели автомобилей отказывают, скорее, из-за израсходованного ресурса, а не из-за срока службы, так что километраж пробега является соответствующей единицей измерения. Кроме того, они изнашиваются так, что предположение о постоянном параметре потока отказов является недопустимым. Электрические лампочки в большей степени отказывают относительно числа включений и выключений и в меньшей степени относительно количества часов горения, что нужно учитывать в определяемом эксплуатационном сроке службы. Наличие избыточных элементов является еще одним фактором, который влияет на выбор показателя безотказности.

Для любой системы необходимо выбрать и определить все требуемые характеристики безотказности и указать количественные требования для каждой характеристики. При определении количественных требований к системе важно учитывать следующие факторы:

- режимы применения системы;
- критерий или определение отказа, то есть то, что представляет собой отказ в данной системе в заданном режиме;
- условия эксплуатации;
- условия окружающей среды.

При установлении в спецификации значения показателя безотказности должны быть приняты во внимание следующие факторы:

- ограничения, налагаемые технологическим состоянием области техники, видом и сложностью системы;
- опыт покупателя в эксплуатации и техническом обслуживании конкретного вида системы;
- возможность проверки указанного требования;
- уровень безотказности узлов, компонентов и т.д., из которых система может быть изготовлена;
- стоимость проектирования, производства, контроля и проверки системы заданным уровнем безотказности.

В табл. 5.2 даны примеры количественных требований к показателям безотказности.

Т а б л и ц а 5.2

Требования к безотказности

Показатели свойства безотказности	Обозначение	Требование
Средняя интенсивность отказов	$\lambda(t_1, t_2)$	$\leq 27 \times 10^{-6}$
Средняя наработка до отказа	MTTF	$\geq 37000$ ч
Средний параметр потока отказов	$z(t_1, t_2)$	$\leq 1,5$ ч <sup>-1</sup>
Средняя наработка между отказами	MTBF	$\geq 6000$ ч
Вероятность безотказной работы	$R(t_1, t_2)$	$\geq 0,9$

П р и м е ч а н и е . Числовые значения показателей в таблице даны только для того, чтобы проиллюстрировать, как они могут быть заявлены в спецификации. Их не следует рассматривать как стандартизированные значения.

Качественные требования

Качественные требования к безотказности могут быть выражены одним или обоими из следующих способов:

- конструкторские решения для системы;
- действия по повышению безотказности, применяемые на стадиях жизненного цикла системы.

Конструктивные критерии для системы, такие, как физические, требования производительности и эксплуатационные критерии, обычно даются отдельно, но они также могут быть дополнением к количественным требованиям безотказности. Такие критерии могут косвенно налагать требования к безотказности к самой системе и способам установки системы и контроля ее производительности. Например:

- признак одиночной неисправности, то есть состояние системы, когда одиночный отказ может привести к критическому состоянию системы;
- признак накапливающейся неисправности, то есть состояние системы, когда невыявленный отказ в сочетании с дополнительными отказами может вызвать отказ системы;
- разделение путей, обеспечение независимости резервных подсистем за счет использования отдельных путей, кабелей, волноводов и т.д. для сигнальных каналов, питания и других средств поддержки;
- мониторинг критических функций, то есть должна быть предусмотрена автоматическая или ручная проверка критических функций непрерывно или с интервалами, в целях поддержания заданного уровня безотказности.

В дополнение к определению количественных требований безотказности может быть целесообразным указать последовательность действий по усовершенствованию безотказности (и ремонтпригодности), которые будут осуществляться на стадиях жизненного цикла системы. Такие качественные требования могут быть применены для оборудования, про-



граммного обеспечения и поддержки. Эти мероприятия особенно важны, если количественные требования не охватывают всех аспектов обеспечения безотказности системы. Они должны быть согласованы между потребителем и поставщиком как технически, так и с точки зрения графика времени и затрат.

План обеспечения безотказности должен быть адаптирован в соответствии с характером системы и требованиями и, как правило, включать в себя:

- виды применяемых методов анализа;
- программу повышения безотказности (в случае необходимости);
- спецификацию по проверке соответствия требованиям (или любые другие качественные и/или количественные меры, которые будут использованы для выражения степени соответствия требованиям);
- критерии выбора компонентов и меры по обеспечению качества данных;
- анализ наихудшего случая.

### Верификация и валидация безотказности

Спецификация должна содержать методы, которые будут использоваться для предоставления доказательств выполнения указанных требований.

Верификация и валидация безотказности могут быть осуществлены либо на основе анализа в ходе проектирования и перед производством путем проведения лабораторных или полевых испытаний после производства, либо оценкой эксплуатационной деятельности после поставки. Кроме того, верификация и валидация возможны в ходе осуществления других видов деятельности в процессе разработки. Примеры включают в себя анализ проектирования (такой, как анализ нагрузок), испытание функционирования, испытание программного обеспечения и моделирование эксплуатации. Доказательства могут быть собраны из всех источников в целях обеспечения верификации и валидации.

#### Верификация и валидация при испытаниях

Предпочтительные методы верификации и валидации безотказности путем испытаний, как правило, выбираемые по согласованию между потребителем и поставщиком, включают в себя:

- сбор и анализ данных отказов системы в эксплуатации. При этом требуется сбор достаточного числа данных, что может быть слишком поздно в процессе закупок;
- испытание системы в эксплуатации или в лаборатории в соответствии с планами и правилами испытаний по ГОСТ Р 27.402, ГОСТ Р 27.403.

При планировании лабораторных испытаний важно рассмотреть зависимые факторы, такие, как стоимость и время.

Требования к испытаниям должны отражать эксплуатационные и экологические условия и нагрузки, которые система будет испытывать, в противном случае результат не будет отражать в ходе эксплуатации реальную надежность системы.

Необходимо определить точные критерии отказов аппаратных средств и программного обеспечения, чтобы все отказы были классифицированы в соответствующих категориях. Эта классификация лежит в основе принятия или отклонения решений, и очень важно, что она должна быть четко и ясно указана до начала испытаний. Желательно определить ее в начале жизненного цикла, чтобы не было подозрений, что результаты были скорректированы для обеспечения желаемого результата. Однако может оказаться невозможным определить все критерии до поздних стадий жизненного цикла системы.

Верификацию и валидацию показателей безотказности для ремонтируемых и неремонтируемых систем следует рассматривать отдельно.

ГОСТ Р 27.403 содержит планы испытаний, если в качестве показателя безотказности используют вероятность безотказной работы, и ГОСТ Р 27.402 содержит планы испытаний, если в качестве показателя безотказности используют среднюю наработку до отказа или между отказами.

#### Верификация и валидация путем анализа

Верификация и валидация безотказности системы могут быть сделаны до ее поставки путем расчетов на основе анализа. В некоторых случаях (например, для систем, обладающих очень высоким уровнем безотказности) это может быть единственным практическим подходом. Анализ может быть использован задолго до проверки безотказности в эксплуатации или в лабораторных испытаниях. В таких случаях только с помощью анализа можно определить, соответствует ли рассматриваемая система требованиям, изложенным в спецификации, хотя анализ не измеряет реализованную безотказность напрямую.

Примеры аналитических методов верификации и валидации безотказности системы, включая аппаратное и программное обеспечение, включают в себя методы, приведенные в ГОСТ Р 27.301. Аппаратная часть системы должна быть проанализирована с тем, чтобы установить, что уровень отказов каждой из ее подсистем, частей и электронных или других компонентов учтен в предполагаемых вариантах использования. Для этой цели необходимы электрические, тепловые и другие измерения.

Программное обеспечение в системе должно быть точно так же проанализировано в целях выявления возможных сбоев. Данные для таких расчетов могут быть основаны, например, на результатах, полученных из опыта работы с подобными системами, по результатам лабораторных

испытаний и из признанных источников данных. Если потребитель намерен указать использование определенной базы данных (например, особенности банка данных отказов), то это должно быть согласовано с поставщиком. Указание использования определенной базы данных, однако, не освобождает поставщика от его обязательств по достижению требуемых характеристик надежности. Во всех случаях необходимо определить исходные данные и записать допущения, использованные при оценке.

### Ремонтопригодность

Ремонтопригодность является важным показателем надежности для всех видов восстанавливаемых систем и отражает способность системы быть сохраненной в состоянии или восстановленной до состояния, в котором она может выполнять требуемую функцию (например, промежуточные обновления программных средств систем в удаленных местах, которые трудно поддерживать). Кроме того, ремонтопригодность может иметь значительное влияние на достигнутую надежность, особенно в системах, не содержащих избыточности.

#### Спецификации ремонтопригодности

##### Количественные требования

Может быть необходимым указание требований к корректирующему и профилактическому обслуживанию отдельно, так как поддержка их технического обслуживания может сильно отличаться.

Если количественные требования указывают, то важно определить, как долго можно допустить неработоспособное состояние системы из-за технического обслуживания. Это время должно быть указано в соответствующих показателях, таких, как среднее или квантиль времени ремонта, среднее или квантиль логистической задержки. Количественные требования могут быть указаны также в терминах расходов на техническое обслуживание за определенное время или же расходов на техническое обслуживание за единицу времени эксплуатации.

Полная спецификация требований к ремонтопригодности должна охватывать пять основных областей:

- характеристики ремонтопригодности, которые должны быть достигнуты при разработке системы;
- ограничения, которые возникают при эксплуатации системы и будут влиять на техническое обслуживание;
- требования к программе обеспечения ремонтопригодности, которую поставщику предстоит выполнить для гарантии соответствия поставляемой системы требуемым характеристикам ремонтопригодности;

- требования доступа к техническому обслуживанию;
- обеспечение планирования поддержки технического обслуживания.

При определении требований ремонтпригодности важно указать на следующие обстоятельства:

- различные эксплуатационные и экологические условия, при которых работает система;
- квалификация, обязанности и физические данные персонала, ответственного за эксплуатацию и техническое обслуживание системы;
- применяемый принцип обслуживания, соответствующие процедуры и меры поддержки (например, профилактика или диагностическое тестирование);
- имеющийся инструмент и любой специальный инструмент;
- предоставляемый запасный инструмент и принадлежности.

Спецификация на ремонтпригодность должна детализировать требования и методы подтверждения. Она также должна включать в себя четкие определения используемых терминов со ссылками на стандарты и словари, к которым можно обращаться в случае необходимости.

Требования к ремонтпригодности могут быть указаны в спецификации как цель или как определенные требования, которые должны быть подтверждены в соответствии с установленными процедурами. Цели или требования могут быть заданы количественно или качественно.

Спецификация на характеристики ремонтпригодности обычно охватывает различные аспекты обеспечения ремонтпригодности на различных уровнях эксплуатации. Однако, поскольку характеристика ремонтпригодности как характеристика системы влияет на расходы по техническому обслуживанию, а также может влиять на сроки обслуживания на разных его уровнях, требования должны быть включены в спецификацию, охватывающую результаты, достигаемые на всех уровнях, затрагиваемых политикой технического обслуживания.

В табл. 5.3 даны примеры количественных требований к ремонтпригодности.

Т а б л и ц а 5.3

#### Требования к ремонтпригодности

Показатели свойства ремонтпригодности	Обозначение	Требование
Средняя продолжительность ремонта	MRT	<5ч
Средняя продолжительность корректирующего технического обслуживания		<5,5ч
Среднее время до восстановления	MTTR	<7ч <sup>-1</sup>
Полнота обнаружения неисправностей		>0,95
Полнота ремонта		>0,8

Примечание. Числовые значения показателей в таблице даны только для того, чтобы проиллюстрировать, как они могут быть заявлены в спецификации. Их не следует рассматривать как стандартизированные значения.

### Качественные требования

Если требования к поддержке ремонтпригодности не могут быть определены количественно, следует использовать качественные требования. Однако, как и со всеми характеристиками надежности, могут быть заданы как количественные, так и качественные требования. Это может быть, например, указанием в спецификации на степень соответствия системы конкретным условиям и ограничениям, связанным с техническим обслуживанием.

### Верификация и валидация ремонтпригодности

Большая часть верификации и валидации ремонтпригодности может быть осуществлена путем других исследований или анализа в ходе опытно-конструкторских работ.

Верификация и валидация характеристик ремонтпригодности – это процесс определения того, что требования, указанные в спецификации, выполнены. Методы и процедуры верификации и валидации должны быть указаны совместно с требованиями к ремонтпригодности. Методы верификации и валидации могут варьироваться от предоставления поставщиком соответствующих данных или информации до требования выполнения специальной демонстрации ремонтпригодности.

Верификацию и валидацию ремонтпригодности следует рассматривать как непрерывный процесс. Данные, относящиеся к ремонтпригодности, получают, собирают и оценивают по мере того, как они становятся доступными в ходе развития проекта, и эти результаты надо постоянно сравнивать с заданными требованиями к ремонтпригодности.

Применяют несколько методов проверки характеристик ремонтпригодности:

- анализ и обзор характеристик ремонтпригодности;
- специальные исследования;
- демонстрационные испытания;
- обзор опыта эксплуатации.

Спецификация может дать рекомендации или указать, какой из этих методов следует применять.

### Поддержка технического обслуживания

Средства технического обслуживания определяют способность организации, занимающейся техническим обслуживанием, обеспечить ресурсы, необходимые для технического обслуживания системы, то есть когда и где это необходимо и когда средства технического обслуживания служат решающим фактором обеспечения надежности систем. Средства техни-

ческого обслуживания очень часто зависят от условий эксплуатации и факторов, которые изменяются на протяжении всего жизненного цикла.

Средства технического обслуживания могут предоставляться полностью или частично поставщиком, потребителем системы или третьей стороной, в зависимости от характера спецификации. Следовательно, спецификация будет зависеть от источника технического обслуживания. Комплексное материально-техническое обеспечение – метод, с помощью которого предоставляются все услуги по логистике и который рассматривают как неотъемлемую часть разработки продукта. В других случаях, особенно когда системы построены главным образом на коммерческом оборудовании, поставщики предоставляют только основное или стандартизованное планирование средств технического обслуживания, а потребители берут на себя ответственность за предоставление необходимого технического обслуживания и его средств для конкретных областей применения, часто с использованием внутренних ресурсов (см. ГОСТ Р 27.601).

В тех случаях, когда средства технического обслуживания предоставляются поставщиком, они должны быть указаны как часть поставки. Средства технического обслуживания, предоставляемые потребителем (пользователем), входят в заданные условия эксплуатации системы в качестве предпосылки для заявленных значений безотказности, готовности и ремонтпригодности.

### Спецификации по поддержке технического обслуживания

#### Количественные требования

Требования к средствам технического обслуживания по возможности должны быть указаны количественно. Примерами таких количественных спецификаций являются гарантируемое время выполнения заказа, средняя административная задержка, средняя задержка материально-технического обслуживания, вероятность нехватки или задержка поставки запасных частей.

При задании требований к поддержке технического обслуживания должны быть установлены:

- различные эксплуатационные и экологические условия, при которых система эксплуатируется;
- обязанности и ответственности потребителя, поставщика и третьих лиц;
- используемая политика технического обслуживания и соответствующие процедуры и средства;
- доступный и специальный инструмент или требуемые приспособления;
- квалификация, обязанности и физические данные персонала, ответственного за эксплуатацию и техническое обслуживание системы.

Спецификации на средства технического обслуживания должны быть подготовлены до начала разработки системы и обновлены до сдачи системы.

В табл. 5.4 даны примеры количественных требований к средствам технического обслуживания.

Т а б л и ц а 5.4

Требования к поддержке технического обслуживания

Показатели свойства поддержки технического обслуживания	Обозначение	Требование
Средняя административная задержка		2 ч
Средняя логистическая задержка		1 ч
Вероятность нехватки запасных частей		< 0,005

Примечание. Числовые значения показателей в таблице даны только для того, чтобы проиллюстрировать, как они могут быть заявлены в спецификации. Их не следует рассматривать как стандартизированные значения.

#### Качественные требования

Если количественные требования к средствам технического обслуживания не могут быть установлены, то следует указывать качественные требования. Однако, как и со всеми характеристиками надежности, могут быть указаны как количественные, так и качественные требования. Это могут быть, например, спецификации на требуемый уровень подготовки и квалификации, стандарт на обслуживающий персонал или требования к доступности оборудования и инструмента.

#### Верификация и валидация технического обслуживания

Методы верификации и валидации технического обслуживания тесно связаны с верификацией и валидацией ремонтпригодности и маловероятно, что они могут быть разделены, поскольку характеристики ремонтпригодности зависят от доступных средств технического обслуживания.

#### **Проверка постоянства интенсивности отказов и параметра потока отказов**

Для проверки постоянства интенсивности отказов и параметра потока отказов применяются числовые и графические методы. Графические методы позволяют идентифицировать непостоянство интенсивности отказов и параметра потока отказов и выявить ранние отказы. Методы подходят для анализа результатов испытаний и данных эксплуатации. В частности, они предназначены для:

- проверки соответствия наработок до отказа невозстанавливаемых объектов экспоненциальному распределению, то есть постоянства интенсивности отказов;

– проверки наличия тренда наработок между отказами восстанавливаемого(ых) объекта(ов), то есть увеличения или уменьшения параметра потока отказов;

– построения графиков интенсивности отказов или параметра потока отказов, используемых для проверки предположения об их постоянстве, оценки их значения или идентификации характера их изменений.

Для применения рассмотренных ниже методов необходимо обеспечить выполнение следующих требований.

При испытаниях *n* невосстанавливаемых объектов для проверки предположения о постоянстве интенсивности отказов:

- для расчетных методов требуется не менее шести наработок до отказа;
- для графического метода – не менее четырех наработок до отказа.

При испытаниях одного или более восстанавливаемых объектов для проверки предположения о постоянстве параметра потока отказов:

- для расчетных методов требуется не менее шести наработок между отказами;
- для графического метода – не менее четырех наработок между отказами.

Для восстанавливаемых объектов предполагают, что время ремонта пренебрежимо мало.

По статистическому критерию для проверки постоянства интенсивности отказов испытания завершаются при достижении заданного времени, заданной наработки или заданного количества отказов.

Графические методы:

- График вероятности основан на линейном преобразовании функции экспоненциального распределения. Его применяют, когда наработки до отказа известны для каждого восстанавливаемого объекта или когда испытания всех объектов завершаются при достижении заданного времени наблюдений или заданного количества отказов.

- График общей наработки за время испытаний (далее – график *TTT* – *Total time on test*) является эмпирическим и независимо от масштаба применяется для данных, когда наработки до отказа известны для всех восстанавливаемых объектов.

- График функции опасности является линейным преобразованием совокупной функции опасности для экспоненциального распределения и применяется в случае, когда наработки до отказа известны для каждого восстанавливаемого объекта, а испытания завершаются при достижении заданного времени или заданного количества отказов, а также в случае, когда объекты были сняты с испытаний в произвольные моменты времени.



## Статистический метод проверки постоянства интенсивности отказов

Рассматриваемый статистический метод применяют в том случае, когда испытаниям подвергают  $n$  объектов, а завершают испытания при достижении установленного количества отказов  $r$  (испытания с ограниченным количеством отказов) или установленного времени  $t$  (испытания с ограниченным временем наблюдений).

Внешние условия испытаний должны быть одинаковыми для всех объектов испытаний. При завершении испытаний не все объекты обязательно откажут. Таким образом, всего будет зафиксировано  $r$  наработок до отказа.

Шаг 1. Нарботки до отказа располагают в порядке неубывания и обозначают упорядоченную выборку  $t_1, t_2, \dots, t_r$ .

Вычисляют суммарные наработки всех образцов до момента  $i$ -го отказа для  $i$  от 1 до  $r$ .

$$T_i = \sum_{k=1}^i t_k + (n-i)t_i.$$

Например, при  $i=2$

$$T_2 = t_1 + (n-1)t_2,$$

т.е. к моменту возникновения второго отказа самый ненадежный образец проработает в течение времени  $t_1$  и откажет, а остальные  $(n-1)$  образцов проработают в течение времени  $t_2$ .

Для испытаний с ограниченным временем наблюдений  $t^*$  общую суммарную наработку к моменту  $r$ -го отказа вычисляют по формуле

$$T^* = \sum_{k=1}^r t_k + (n-r)t^*.$$

Для испытаний с ограниченным количеством отказов общую суммарную наработку к моменту времени  $t^*$  определяют по формуле

$$T_r = \sum_{k=1}^r t_k + (n-r)t_r.$$

Шаг 2. Для каждой суммарной наработки  $T_i$  находят статистику  $U$  по формуле

$$U = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{r-1} T_i - (r-1) \frac{T_r}{2}}{T_r \sqrt{\frac{r-1}{12}}} & \text{— для испытаний с ограниченным количеством отказов,} \\ \frac{\sum_{i=1}^r T_i - r \frac{T^*}{2}}{T^* \sqrt{\frac{r}{12}}} & \text{— для испытаний с ограниченным временем наблюдений.} \end{cases}$$

Шаг 3. Устанавливают уровень значимости  $\alpha$  ошибочного отклонения предположения о постоянстве интенсивности отказов (в действительности интенсивность отказов является постоянной). Рекомендуемые значения  $\alpha$  приведены в табл. 5.5.

Т а б л и ц а 5.5

Критическое значение  $U_\alpha$  как функция  $\alpha$

$\alpha$	Критическое значение $U_\alpha$
0,025	2,24
0,050	1,96
0,100	1,64

Шаг 4. Предположение о постоянстве интенсивности отказов отклоняют в том случае, если абсолютное значение  $U$  больше критического значения, приведенного в табл. 5.5. В противном случае предположение о постоянстве интенсивности отказов не отклоняют.

Большие положительные значения  $U$  появляются при возрастании интенсивности отказов. И наоборот, большие отрицательные значения  $U$  появляются, когда интенсивность отказов уменьшается.

#### Метод проверки постоянства интенсивности отказов по графику вероятности безотказной работы

Метод применяют в случае, когда наработки до отказа известны для каждого невосстанавливаемого объекта и когда испытания завершаются в установленное время или при появлении установленного количества отказов.

Шаг 1. Упорядочивают наработки до отказа в порядке неубывания (от наименьшего до наибольшего)  $t_1, t_2, \dots, t_r$ .

Шаг 2. Вычисляют значение вспомогательной функции  $R(i, n)$ :

$$R(i, n) = \frac{n - i + 0,7}{n + 0,4},$$

где  $i$  – индекс, соответствующий номеру наработки до отказа  $t_i$ ,

$n$  – объем выборки, равный количеству невосстанавливаемых объектов испытаний.

Следует отметить, что функция  $R(i, n)$  является оценкой вероятности безотказной работы в момент времени, равный наработке до  $i$ -го отказа при испытаниях  $n$  объектов с постоянной интенсивностью отказов, обычно ее обозначают  $\hat{R}(i, n)$ . Крышечка в обозначении  $\hat{R}(i, n)$  в приведенной выше формуле опущена, поскольку в данном случае нет необходимости различать оценку и истинное значение.

Шаг 3. Изображают график логарифма  $R(i,n)$  как функцию соответствующей наработки до отказа.

Шаг 4. Если график функции  $\ln(R(i,n))$  представляет собой прямую линию, то нет оснований для отклонения предположения о постоянстве интенсивности отказов, а оценкой интенсивности отказов может быть абсолютное значение углового коэффициента этой прямой. В противном случае предположение о постоянстве интенсивности отказов должно быть отклонено.

#### Метод проверки постоянства интенсивности отказов по графику общей наработки за время испытаний

Метод применяют в случае, когда наработки до отказа известны для каждого невосстанавливаемого объекта испытаний.

Шаг 1. Наработки до отказов упорядочивают в порядке неубывания (от наименьшего до наибольшего)  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , где  $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ .

Шаг 2. Вычисляют значения общих наработок за время испытаний (ТТТ)  $S_i, i=1, 2, \dots, n$ , соответствующих каждой наработке до отказа, считая  $S_i=0$ .

$$S_i = nt_1 + (n-1)(t_2 - t_1) + \dots + (n-i)(t_{i+1} - t_i).$$

Шаг 3. Определяют нормализованные значения ТТТ  $Z_i$ :

$$Z_i = \frac{S_i}{S_n}.$$

Шаг 4. Изображают график нормализованных значений ТТТ  $Z_i$  в зависимости от доли объектов, отказавших за это время  $\frac{i}{n}, i=1, 2, \dots, n$ , в линейном масштабе и соединяют точки на графике с помощью отрезков прямой.

Шаг 5. Если график ТТТ представляет собой прямую линию, то нет оснований для отклонения предположения о постоянстве интенсивности отказов, а в качестве оценки интенсивности отказов можно использовать абсолютное значение углового коэффициента прямой. В противном случае предположение о постоянстве интенсивности отказов должно быть отклонено.

#### Метод проверки постоянства интенсивности отказов по графику функции опасности

Метод применяют в случаях, когда наработки до отказа известны для каждого невосстанавливаемого объекта, а испытания всех объектов завершаются в установленное время или при достижении установленного

количества отказов. Метод используют в случае, когда данные испытаний включают в себя наработки до отказа невосстанавливаемых объектов и наработки неотказавших объектов, снятых с испытаний в произвольные моменты времени.

Шаг 1. Нарботки располагают в порядке неубывания (от наименьшего до наибольшего) и обозначают  $i$ -ю наработку до отказа  $t_i$  ( $t_1 \leq \dots \leq t_i \leq \dots \leq t_n$ ).

Шаг 2. Вычисляют для всех наработок обратные ранги  $n, (n-1), \dots, 2, 1$ , где  $n$  – общее количество наработок. Обратный ранг  $i$ -й наработки находят по формуле  $(n-i+1)$ .

Шаг 3. Определяют функцию опасности для каждой наработки как отношение 100 к соответствующему обратному рангу. Следовательно, функция опасности для  $i$ -й наработки равна:

$$\frac{100}{n-i+1}.$$

Шаг 4. Вычисляют совокупную функцию опасности  $H_i$  для каждой наработки как сумму функции опасности в  $i$ -й точке и предыдущей совокупной функции опасности.

Шаг 5. Изображают график совокупной функции опасности в зависимости от наработки до отказа в линейном масштабе. При этом на графике должны быть указаны только наработки до отказа, а не текущее время. Текущее время используют только при анализе графика. Совокупную функцию опасности можно применять для вычисления и построения графика вероятности безотказной работы

$$R_i = \exp(-H_i).$$

Шаг 6. Если график данной функции представляет собой прямую линию, то нет оснований для отклонений предположения о постоянстве интенсивности отказов, а в качестве интенсивности отказов может быть использовано абсолютное значение углового коэффициента прямой. В противном случае предположение о постоянстве интенсивности отказов должно быть отклонено.

#### Действия в случае отклонения предположения о постоянстве интенсивности отказов

Если предположение о постоянстве интенсивности отказов отклонено, рекомендуется проанализировать данные для определения возможной причины. Результаты вычислений, если возможно, всегда должны сопровождаться физическими и техническими исследованиями.

Причинами изменения интенсивности отказов в рассматриваемом интервале времени может быть износ или наличие процессов, приводящих к ранним отказам объектов. Возможно также, что данные не принадлежат к

одной совокупности, а представляют собой смесь совокупностей с различными интенсивностями отказов, соответствующих различным видам отказов. Необходимо провести исследования всех вышеуказанных ситуаций.

В случае предположений о наличии износа или ранних отказов для невосстанавливаемых объектов необходимо использовать МЭК 61649, а для восстанавливаемых объектов – МЭК 61710. Если имеются предположения о наличии смеси совокупностей, должны быть предприняты меры по их идентификации и разделению. Затем совокупности следует проанализировать отдельно.

Независимо от причины отклонения предположения о постоянстве интенсивности отказов не следует применять методы, использующие эти предположения.

Если предположение о постоянстве интенсивности отказов не отклонено, делают заключение: "не доказано, что распределение наработок до отказа отличается от экспоненциального распределения".

Пример решения задачи по теме «Проверка постоянства интенсивности отказов для невосстанавливаемых объектов»

Исходные данные. Сорок объектов поставлены на испытания в одно и то же время. Испытания были завершены после появления 20-го отказа. В табл. 5.6 приведены упорядоченные наработки до отказа 20 отказавших объектов.

Требуется статистическим методом проверить постоянство интенсивности отказов.

Т а б л и ц а 5.6

Упорядоченные наработки до отказа 20 отказавших объектов

$i$	$t_i$	$i$	$t_i$
1	5	11	55
2	10	12	58
3	17	13	58
4	32	14	61
5	32	15	64
6	33	16	65
7	34	17	65
8	36	18	66
9	54	19	67
10	55	20	68

**Шаг 1.** Нарботки до отказа располагают в порядке неубывания и определяют суммарные наработки до  $i$ -го отказа (табл. 5.7).

Таблица 5.7

## Суммарные наработки до отказа 20 объектов

$i$	$t_i$	$T_i$
1	5	200
2	10	395
3	17	661
4	32	1216
5	32	1216
6	33	1251
7	34	1285
8	36	1351
9	54	1927
10	55	1958
11	55	1958
12	58	2045
13	58	2045
14	61	2126
15	64	2204
16	65	2229
17	65	2229
18	66	2252
19	67	2274
20	68	2295

Данные испытания являются испытаниями с ограниченным количеством отказов, следовательно,  $T_r=2295$ .

Шаг 2. Вычисляют значение статистики  $U$  по формуле

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{r-1} T_i - (r-1) \frac{T_r}{2}}{T_r \sqrt{\frac{r-1}{12}}} = \frac{30822 - 19 \cdot \frac{2295}{2}}{2295 \sqrt{\frac{19}{22}}} = 3,123.$$

Шаги 3 и 4. Для уровня значимости  $\alpha=10\%$  статистика  $U$  превышает критическое значение  $U_\alpha=1,64$  (см. таблицу 5.5). Поэтому предположение о постоянстве интенсивности отказов отклоняют. Положительное значение статистики  $U$  указывает на увеличение интенсивности отказов.

## Проверка постоянства параметра потока отказов

Объект проверки постоянства параметра потока отказов относится к восстанавливаемым объектам. Результаты наблюдений представляют

собой последовательность наработок между отказами. Методы проверки постоянства параметра потока отказов предполагают, что наработки между последовательными отказами не имеют тенденции ни к увеличению, ни к уменьшению. Если такая тенденция отсутствует, то объект испытаний после каждого ремонта можно рассматривать как новый.

Параметр потока отказов сложной большой системы может быть постоянным, даже если ее составные части не имеют постоянных интенсивностей отказов. Например, параметр потока отказов может быть практически постоянным для ремонтируемого объекта, даже если компоненты объекта подвержены изнашиванию.

### Расчетный метод проверки постоянства параметра потока отказов для единственного восстанавливаемого объекта

Данный расчетный метод применим при наличии не менее шести последовательных наработок между отказами, зарегистрированных за время испытаний  $T^*$ .

Шаг 1. Для восстанавливаемого объекта суммарная наработка до  $i$ -го отказа равна  $T_i$ . Метод применим также для последней наработки  $T_r$  и любой другой большей наработки  $T^*$ , в процессе которой объект продолжал функционировать.

Наработку между последовательными отказами определяют по формуле  $t_i = T_i - T_{i-1}$ .

Шаг 2. Для каждой суммарной наработки вычисляют статистику  $U$  по формуле

$$U = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{r-1} T_i - (r-1) \frac{T_r}{2}}{T_r \sqrt{\frac{r-1}{12}}}, & \text{если } T^* = T_r, \\ \frac{\sum_{i=1}^r T_i - r \frac{T^*}{2}}{T^* \sqrt{\frac{r}{12}}}, & \text{если } T^* > T_r, \end{cases}$$

Шаг 3. Назначают уровень значимости  $\alpha$  для ошибочного отклонения предположения о постоянстве параметра потока отказов. Рекомендуемые значения  $\alpha$  приведены в табл. 5.5.

Шаг 4. Если абсолютное значение  $U$  больше критического значения, приведенного в табл. 5.5, предположение о постоянстве параметра потока отказов отклоняют. В противном случае это предположение не отклоняют.

Если параметр потока отказов является постоянным, статистика  $U$  подчиняется нормированному нормальному распределению. Большие абсолютные значения  $U$  являются основанием для отклонения предположения о постоянстве параметра потока отказов.

Большие положительные значения  $U$  появляются в тех случаях, когда существует тенденция к уменьшению наработок между последовательными отказами. Наоборот, большие отрицательные значения  $U$  появляются в тех случаях, когда наработки имеют тенденцию к увеличению, что соответствует уменьшению параметра потока отказов.

Неотклонение предположения о постоянстве параметра потока отказов не следует интерпретировать как соответствие наработок между последовательными отказами восстанавливаемого объекта экспоненциальному распределению. Единственное заключение, которое можно сделать в этом случае, это то, что наличие тренда наработок не доказано. Несмотря на то что предположение о постоянстве параметра потока отказов не противоречит экспоненциальному распределению наработок между отказами, наработки могут подчиняться другому распределению, имеющему тренд параметра потока отказов.

Пример решения задачи по теме «Проверка постоянства параметра потока отказов для единственного восстанавливаемого объекта»

*Исходные данные.* Единственный объект был подвергнут испытаниям в течение 6 мес. ( $T^* = 4380$  ч). За время испытаний зафиксировано восемь отказов объекта, которые произошли в моменты времени  $T_i$ . Значения  $T_i$  приведены в табл. 5.8.

*Требуется.* Расчетным методом проверить постоянство параметра потока отказов.

Т а б л и ц а 5.8

Моменты отказа объекта испытаний

$i$	$T_i$
1	25
2	94
3	282
4	384
5	835
6	1279
7	2048
8	3253



Шаг 1. Рассчитанные суммарные наработки до отказа приведены в табл. 5.9.

Т а б л и ц а 5.9

Суммарные наработки до отказа

$i$	$T_i$
1	25
2	94
3	282
4	384
5	835
6	1279
7	2048
8	3253

Шаг 2. Вычисляют значение статистики  $U$  по формуле

$$U = \frac{\sum_{i=1}^r T_i - r \frac{T^*}{2}}{T^* \sqrt{\frac{r}{12}}} = \frac{8200 - 8 \cdot \frac{4380}{2}}{4380 \sqrt{\frac{8}{12}}} = -2,61.$$

Шаги 3 и 4. Для уровня значимости  $\alpha = 10\%$  абсолютное значение статистики  $U$  превышает критическое значение  $U_\alpha = 1,64$  (см. табл. 5.5), поэтому предположение о постоянстве параметра потока отказов отклоняют. Отрицательное значение статистики указывает на уменьшение параметра потока отказов.

Расчетный метод проверки постоянства параметра потока отказов  
нескольких восстанавливаемых объектов

Если имеются данные для нескольких восстанавливаемых объектов, соответственно проверяют постоянство параметра потока отказов каждого объекта.

Т а б л и ц а 5.10

Вычисление наработок до отказа нескольких восстанавливаемых объектов

Объект $i$	Суммарная наработка за весь период наблюдения $T_i^*$	Общее количество отказов за весь период наблюдений $r_i$	Моменты возникновения $j$ -х отказов, $j = 1, 2, \dots, r_i$
1	$T_1^*$	$r_1$	$T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1r_1}$
2	$T_2^*$	$r_2$	$T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2r_2}$
...	...	...	...
$k$	$T_k^*$	$r_k$	$T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{kr_k}$

Шаг 1. Для каждого объекта фиксируют суммарную наработку за весь период наблюдений, общее количество наблюдаемых отказов и соответствующие им наработки (см. табл. 5.10).

Если испытания некоторых объектов проводились до  $r$ -го отказа, то для этого объекта устанавливают  $T^*=T_r$  и  $r=r-1$ .

Шаг 2. Вычисляют статистику  $U$  по формуле

$$U = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_i} T_{ij} - 0,5(r_1 T_1^* + r_2 T_2^* + \dots + r_k T_k^*)}{\sqrt{\frac{1}{12}(r_1 T_1^{*2} + r_2 T_2^{*2} + \dots + r_k T_k^{*2})}}.$$

Шаг 3. Устанавливают уровень значимости  $\alpha$  для ошибочного отклонения предположения о постоянстве параметра потока отказов при условии, что в действительности он является постоянным. Рекомендуемые значения  $\alpha$  приведены в табл. 5.5.

Шаг 4. Предположение о постоянстве параметра потока отказов для всех идентичных объектов отклоняют в том случае, если абсолютное значение  $U$  больше критического значения, приведенного в таблице 5.5. В противном случае предположение не отклоняют.

В соответствии с предположением об отсутствии тренда, т.е. о постоянстве параметра потока отказов в течение продолжительного периода времени, статистика  $U$  подчиняется нормированному нормальному распределению. Большие абсолютные значения  $U$  являются основанием для отклонения данного предположения.

Большие положительные значения  $U$  появляются при наличии тенденции к уменьшению наработок между последовательными отказами в любом из идентичных объектов. Наоборот, большие отрицательные значения  $U$  появляются в том случае, когда эти наработки имеют тенденцию к увеличению, т.е. параметр потока отказов уменьшается хотя бы в одном из идентичных объектов.

Неотклонение предположения о постоянстве параметра потока отказов означает только то, что нет достаточно веских оснований для отклонения предположения о постоянстве параметров потока отказов всех идентичных объектов.

#### Пример решения задачи по теме «Проверка постоянства параметра потока отказов для нескольких восстанавливаемых объектов»

*Исходные данные.* На испытания поставлены три идентичных восстанавливаемых объекта. Данные об отказах приведены в табл. 5.11.

*Требуется.* Расчетным методом проверить постоянство параметра потока отказов.

Т а б л и ц а 5.11

Данные об отказах для трех восстанавливаемых объектов

Объект $i$	Суммарная наработка до отказа	Суммарная наработка за время испытаний
1	5, 8	12
2	-	16
3	1, 8, 16	20

Шаг 1. За время испытаний вычисляют суммарную наработку для каждого объекта, общее количество наблюдаемых отказов и соответствующие наработки (табл. 5.12).

Т а б л и ц а 5.12

Рабочая таблица вычислений

Объект $i$	Суммарная наработка за время испытаний $T_i^*$	Общее количество отказов	Наработка, соответствующая $j$ -му отказу $i$ -го объекта $T_{ij}$			$\sum_{j=1}^{r_i} T_{ij}$
			1	2	3	
1	12	2	5	8	-	13
2	16	0	-	-	-	0
3	20	3	1	8	16	25

Шаги 3 и 4. Для уровня значимости  $\alpha=10\%$  абсолютное значение статистики  $U$  не превышает критическое значение  $U_\alpha=1,64$  (см. табл. 5.5), поэтому предположение о постоянстве параметра потока отказов принимается.

#### Графический метод проверки постоянства параметра потока отказов нескольких восстанавливаемых объектов

Данный графический метод применяют при наличии данных для одного или большего количества восстанавливаемых объектов, даже если наблюдения за ними проводились в течение различных периодов времени. График позволяет идентифицировать характер тренда параметра потока отказов. Метод может помочь установить постоянство параметра потока отказов и применяется как дополнение к расчетным методам, приведенным выше.

Построение графика позволяет также идентифицировать другие особенности параметра потока отказов, такие, как отказы на ранних этапах эксплуатации объекта.

График позволяет проводить эмпирический анализ наблюдаемых отказов для восстанавливаемых объектов. Он не требует наличия пред-

положений о форме основного процесса, из которого получены данные. Анализ графика является простым средством идентификации характера параметра потока отказов, применимым в общем случае для нескольких восстанавливаемых объектов, и может быть полезным для выявления отклонений от постоянства параметра потока отказов.

Шаг 1. Упорядочивают суммарные наработки до  $j$ -го отказа  $i$ -го объекта  $T_{ij}$  в порядке неубывания, где  $i=1, 2, \dots, k$ .

Шаг 2. Идентифицируют  $m$  – количество уникальных (различных по величине) суммарных наработок до отказа.

Шаг 3. Обозначают упорядоченные уникальные суммарные наработки до  $j$ -го отказа по всем объектам  $T_j$ , ( $j=0, 1, \dots, m$ ),  $T_1 < T_2 < \dots < T_m$ .

Шаг 4. Вычисляют  $r_i(T_j)$  – количество отказов  $i$ -го объекта за суммарную наработку  $T_j$ .

Шаг 5. Определяют значение индикаторной переменной  $N_i(T_j)$ , которая равна 1, если наблюдения за  $i$ -м объектом проводились в момент времени  $T_j$ , и равна 0, если наблюдения за  $i$ -м объектом в момент времени не проводились.

Шаг 6. Вычисляют среднее суммарное количество наработок до отказа за время  $T_j$ :

$$M(T_j) = \sum_{l=1}^j \frac{r(T_l)}{N(T_l)},$$

где  $r(T_l) = \sum_{i=1}^k r_i(T_l)$ ;

$$N(T_l) = \sum_{i=1}^k N_i(T_l).$$

Шаг 7. Строят график  $M(T_j)$ , ( $j=0, 1, \dots, m$ ).

Шаг 8. Постоянный параметр потока отказов соответствует линейному характеру графика. Любое отклонение от прямой линии указывает на то, что параметр потока отказов не постоянен.

Шаг 9. Границы двустороннего доверительного интервала  $M(T_j)$  определяют по следующей формуле:

$$M(T_j) \pm U_{\alpha/2} \sqrt{Var(T_j)},$$

где  $U_{\alpha/2}$  – квантиль уровня  $\alpha/2$  нормированного нормального распределения, соответствующий уровню доверия  $100(1 - \alpha)\%$ .

Рекомендуемые значения приведены в табл. 5.13.

$$Var(T_j) = \sum_{i=1}^k \left\{ \sum_{l=1}^j \frac{N_i(T_l)}{N(T_l)} \left[ r_i(T_l) - \frac{r(T_l)}{N(T_l)} \right] \right\}^2.$$

## Квантили нормированного нормального распределения

100(1- $\alpha$ )%	$U_{\alpha/2}$
99	2,58
95	1,96
90	1,64

Если графическая проверка постоянства параметра потока отказов дала отрицательный результат, значит, параметр потока отказов или увеличивается, или уменьшается. Это означает, что вероятность безотказной работы после каждого ремонта увеличивается или уменьшается. Расчетные методы для моделирования этой ситуации приведены в МЭК 61710.

## Повышение надежности систем

Методы повышения надежности систем при проектировании

Возможны два пути повышения надежности систем: 1) повышение надежности элементов; 2) изменение структурной схемы системы.

Повышение надежности элементов, на первый взгляд, представляется наиболее простым приемом увеличения надежности системы. Однако на практике повышение надежности элементов может оказаться невозможным. Как правило, высоконадежные элементы имеют большие габариты, массу и стоимость. Исключение составляют элементы, реализуемые на новых физических и технологических принципах.

Изменение структурной схемы системы с целью повышения надежности подразумевает два аспекта.

С одной стороны, это означает перестройку конструктивной или функциональной схемы системы (изменение состава системы и связей между составными элементами без введения дополнительных функционально избыточных элементов).

С другой стороны, изменение структурной схемы системы понимается как введение в систему дополнительных, функционально избыточных элементов, способных выполнять функции основных элементов. Применение дополнительных средств и возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов называется *резервированием*.

Выделяют несколько **видов резервирования** (структурное, временное, информационное, функциональное и др.). *Структурное резервирование* – это введение в структуру объекта дополнительных элементов, способных выполнять функции основных элементов в случае их отказа.

Классификация способов структурного резервирования осуществляется по различным признакам:

1) по схеме включения резерва:

- *общее резервирование*, при котором резервируется объект в целом;
- *раздельное резервирование*, при котором резервируются отдельные элементы или их группы;
- *смешанное резервирование*, при котором различные способы резервирования сочетаются в одном объекте;

2) по способу включения резерва:

- *постоянное резервирование*, при котором структура объекта при возникновении отказа его элемента не перестраивается;
- *динамическое резервирование*, при котором при отказе элемента происходит перестройка структуры объекта.

3) по состоянию резерва:

- *горячее резервирование*, при котором резервные элементы все время находятся во включенном (рабочем) состоянии и либо одновременно с основными элементами выполняют все их функции (нагруженное резервирование), либо выполняют часть их функций (облегченное резервирование), либо начинают выполнять функции основных элементов только после их отказа (ненагруженное резервирование, называемое в данном случае *резервированием замещением*);
- *холодное резервирование* – резервирование, при котором резервный элемент выключен и в случае отказа основного элемента должен быть включен и запущен вручную.

И холодное, и горячее резервирование может быть *скользящим*, при котором несколько основных элементов резервируется одним или несколькими резервными, каждый из которых может заменить любой основной.

Основной характеристикой структурного резервирования является *кратность резервирования* – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов, выраженное несокращаемой дробью (например, 2:3; 4:2). Резервирование одного основного элемента одним резервным называется *дублированием*.

Количественно повышение надежности системы в результате резервирования или применения высоконадежных элементов можно оценить по *коэффициенту выигрыша надежности*, определяемому как отношение показателя надежности после преобразования системы к этому показателю до преобразования системы.

## Повышение надежности систем при эксплуатации

Для повышения надежности систем в условиях эксплуатации проводят мероприятия, которые можно разделить на три группы: 1) разработка и внедрение научных методов эксплуатации; 2) сбор, анализ опыта эксплуатации; 3) повышение квалификации обслуживающего персонала.

*Научные методы эксплуатации* включают в себя научно обоснованные методы подготовки изделий к работе, проведения их технического обслуживания, ремонта и других мероприятий, направленных на повышение надежности изделий в процессе их эксплуатации.

Для поддержания заданной надежности систем в инструкции по их эксплуатации приводятся сведения, регламентирующие порядок выполнения работ с целью исключения поломок, а также периодичность технических обслуживаний.

Большое значение имеет правильная организация сбора сведений об отказах. Сведения об отказах, полученные в процессе испытаний или эксплуатации, оформляют в виде *карточек учета неисправностей или рекламационных актов*. В этих документах записывается следующее: 1) номер карточки или рекламационного акта; 2) наименование и заводской номер изделия; 3) длительность работы изделия до появления неисправности; 4) условия работы, при которых появилась неисправность; 5) внешние признаки неисправности; 6) заводской номер отказавшего узла, элемента; 7) вероятная причина появления неисправности; 8) способы устранения неисправности (замена, ремонт); 9) время устранения неисправности; 10) дата и подписи заполняющих карточку, рекламационный акт.

Отказы и неисправности, выявленные в процессе эксплуатации, всесторонне анализируются на предприятии-изготовителе и на основании результатов анализа в производство внедряются соответствующие мероприятия, направленные на обеспечение качества и надежности изделий.

## Контрольные вопросы

1. Какие пути существуют для повышения надежности систем?
2. В чем заключаются изменения структурной схемы системы с целью повышения ее надежности?
3. Что называется резервированием?
4. Что называется структурным резервированием?
5. Что называется: а) общим; б) отдельным; в) смешанным резервированием?
6. Что называется: а) постоянным; б) динамическим резервированием?
7. Что называется: а) горячим; б) холодным резервированием?
8. Что называется кратностью резервирования?
9. Что называется коэффициентом выигрыша надежности?

10. Что называется и для чего используется прогнозирование надежности технических объектов?
11. На какие группы подразделяют методы прогнозирования?
12. Что является основными причинами неточного прогнозирования?
13. Что называется отказоустойчивостью (толерантностью) системы?
14. На какие типы делятся системы по способу обеспечения их отказоустойчивости?
15. В каком случае сохраняют свою работоспособность: а) система типа "m из n"; б) последовательная система; в) параллельная система?
16. Начертите структурную схему надежности простейшей мостиковой системы.
17. Что называется комбинированной системой?
18. Для чего используется и что собой представляет структурная блок-схема надежности?
19. Что называется "черным ящиком"?
20. Как называются: а) входные; б) выходные параметры объекта исследования?
21. Для чего предназначен интерполяционный эксперимент?
22. Для чего предназначен экстремальный эксперимент?
23. Какие требования предъявляют к исследуемым факторам?
24. Какие группы мероприятий проводят для повышения надежности систем в условиях эксплуатации?
25. Какие записи делаются в карточках учета неисправностей или рекламационных актах?



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии, рассчитанном на студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Технология транспортных процессов», рассмотрены теоретические основы теории надежности и их практическое применение.

Даны сведения об основных терминах, понятиях и определениях теории надежности, о случайных величинах и их характеристиках. Рассмотрены вероятностные законы распределения, используемые в расчетах надежности. Приведены показатели надежности, способы описания надежности технических систем. Описаны модели отказов изделий.

Описаны расчетные и экспериментальные методы оценки надежности.

Приведены сведения о прогнозировании надежности. Описана система управления надежностью.

Теоретический материал подкреплен практическими задачами, контрольными работами и контрольными вопросами по соответствующим темам.

Приведенный в пособии актуализированный материал отражает вопросы, недостаточно освещенные в ранее изданной учебной литературе для студентов, изучающих дисциплину «Оценка надежности технических систем».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### Основная

1. Половко, А.М. Основы теории надежности [Текст] / А.М. Половко, С.В. Гуров.– СПб.: БХВ-Петербург, 2008.– 704 с.: ил.
2. Острейковский, В.А. Теория надежности [Текст]: учеб. для вузов / В.А. Острейковский.– М.: Высш. шк., 2003.
3. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебник / В.А. Зорин. – М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.
4. Баженов, Ю.В. Основы теории надежности машин [Текст]: учебное пособие / Ю.В. Баженов. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 156 с.
5. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебное пособие / В.А. Зорин, В.А. Даугелло. – М.: Изд. ООО «Техполиграфцентр», 2006. – 183 с.
6. Озорнин, С.П. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебное пособие / С.П. Озорнин. – Чита: Изд. ЧитГУ, 2006. – 123 с.
7. Яхьяев, Н.Я. Основы теории надёжности автомобилей и техническая диагностика [Текст]: учебное пособие / Н.Я. Яхьяев, М.М. Магомедов. – Махачкала: Изд-во Махачкалинского филиала МАДИ (ГТУ), 2006. – 134 с.
8. Малкин, В.С. Техническая эксплуатация автомобилей: Теоретические и практические аспекты [Текст]: учебное пособие / В.С. Малкин. – М.: ИЦ «Академия», 2007. – 288 с.
9. Яхьяев, Н.Я. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебное пособие / Н.Я. Яхьяев, С.Н. Яхьяева. – Махачкала: Изд-во ДГТУ, 2007. – 118 с.
10. Апсин, В.П. Специальные главы надёжности и основы планирования экспериментов [Текст]: учебное пособие / В.П. Апсин, Е.В. Бондаренко, В.И. Рассоха. – Оренбург: Изд-во ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 134 с.
11. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебник / В.А. Зорин. – М.: ИЦ «Академия», 2009. – 208 с.
12. Болдин, А.П. Надёжность и техническая диагностика подвижного состава автомобильного транспорта. Теоретические основы [Текст]: учебное пособие / А.П. Болдин, В.И. Сарбаев. – М.: Изд-во МАИИ, 2010. – 206 с.
13. Николаев, Н.Н. Основы теории надёжности и диагностика [Текст]: учебное пособие / Н.Н. Николаев. – Зерноград: Изд-во ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2010. – 148 с.
14. Яхьяев, Н.Я. Основы теории надёжности [Текст]: учебник / Н.Я. Яхьяев, А.В. Кораблин. – М.: ИЦ «Академия», 2013. – 208 с.

15. Лянденбургский, В.В. Основы научных исследований [Текст]: учебное пособие / В.В. Лянденбургский, А.В. Баженов, В.В. Коновалов. Пенза: ПГУАС, 2013., – 396 с.

16. Лянденбургский, В.В. Основы теории надежности [Текст]: учебное пособие / В.В. Лянденбургский, А.С. Иванов, А.С. Ширшиков. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 228 с.

17. Медведько, М.А. Сборник задач по теории вероятностей [Текст]: учебное пособие / М.А. Медведько, Л.Ю. Шипик. – Зерноград: Изд-во ФГОУ ВПО «АЧГАА», 2005. – 160 с.

18. Степунина, О.А. Основы теории случайных процессов [Текст]: учебно-практическое пособие / О.А. Степунина, Е.Б. Трофимова. – Бузулук: Изд-во БГТИ (филиала) ГОУ ОГУ, 2006. – 117 с.

19. Данилов, А.М. Теория вероятностей и математическая статистика с инженерными приложениями [Текст]: учебное пособие / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: ПГУАС, 2010. – 228 с.

20. Феофанова, Л.Н. Теория вероятностей. Стандартные задачи с основными положениями теории [Текст]: учебное пособие / Л.Н. Феофанова, А.Е. Годенко, В.Н. Стяжин, Л.А. Исаева. – Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2009.–116 с.

21. Агишева, Д.К. Методы принятия оптимальных решений [Текст]: учебное пособие. Ч. 1 / Д.К. Агишева, С.А. Зотова, В.Б. Светличная, Т.А. Матвеева. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГАСУ, 2011. – 155 с.

22. Иванов, С.Е. Спецглавы надёжности, планирование экспериментов и инженерных наблюдений [Текст]: учебное пособие / С.Е. Иванов. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 142 с.

23. Безбородов, Ю.Н. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебное пособие / Ю.Н. Безбородов, А.Н. Сокольников, В.Г. Шрам. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 246 с.

24. Баженов, Ю.В. Основы теории надёжности машин [Текст]: учебное пособие / Ю.В. Баженов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2014. – 320 с.

25. Шлапак, В.П. Управление надёжностью машин [Текст]: учебное пособие / В.П. Шлапак [и др.]. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» – Буква, 2014. – 468 с.

26. Мороз, С.М. Методы обеспечения работоспособного технического состояния автотранспортных средств [Текст]: учебник / С.М. Мороз. – М.: Изд-во МАДИ, 2015. – 204 с.

#### **Дополнительная**

27. Диагностика и техническое обслуживание машин [Текст]: учебник для студентов высших учебных заведений / А.Д. Ананьин [и др.]. – М.: Академия, 2008. – 432 с.

28. Иванов, А.С. Методическое пособие к лабораторным работам по дисциплине «Основы теории надежности и диагностика» [Текст] / А.С. Иванов. – Пенза: ПГСХА, 2000. – 31 с.
29. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] / Е.С. Кузнецов [и др.]; под ред. Е.С. Кузнецова. – М.: Транспорт, 1991. – 413 с.
30. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] / Е.С. Кузнецов [и др.]; под ред. Е.С. Кузнецова. – М.: Наука, 2001. – 535 с.
31. Авдонькин, Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1985. – 216 с.
32. Аринин, И.Н. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] / И.Н. Аринин, С.И. Коновалов, Ю.В. Баженов. – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 315 с. – (Серия «Высшее профессиональное образование»).
33. Безверхний, С.Ф. Основы технологии полигонных испытаний и сертификация автомобилей [Текст] / С.Ф. Безверхний, Н.Н. Яценко. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 600 с.
34. Болдин, А.П. Основы научных исследований и УНИРС. Ч. II. Специальные методы и методические подходы [Текст]: учебное пособие / А.П. Болдин, В.А. Максимов. – М.: МАДИ, 2004. – 181 с.
35. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 38 с.
36. Гурвич, И.Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей [Текст] / И.Б. Гурвич, П.Э. Сыркин. – М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
37. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебник для вузов / В.А. Зорин. – М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.
38. Кузьмин, Н.А. Процессы и закономерности изменения технического состояния автомобилей в эксплуатации [Текст]: учебное пособие / Н.А. Кузьмин. – Н.Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2002. – 142 с.
39. Российская автотранспортная энциклопедия. Т.3. Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт автотранспортных средств [Текст]: справ. и науч.-практ. пособие. – М.: РООИП, 2000. – 456 с.
40. Ротенберг, Р.В. Основы надежности системы водитель – автомобиль – дорога – среда [Текст] / Р.В. Ротенберг. – М.: Транспорт, 1986. – 215 с.
41. Надежность в машиностроении [Текст]: справочник / под общ. ред. В.В. Шашкина и Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.
42. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст]: учебник для вузов / под ред. Е.С. Кузнецова. – М.: Наука, 2001. – 535 с.
43. Александровская, Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем [Текст]: учебник / Л.Н. Александровская, А.П. Афанасьев, А.А. Лисов. – М.: Логос, 2001.
44. Труханов, В.М. Надежность изделий машиностроения [Текст] / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 2008.

45. ГОСТ 15.309-98. Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции. Основные положения [Текст].
46. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. основные понятия. Термины и определения [Текст].
47. ГОСТ 27.203-83. Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности [Текст].
48. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. расчет надежности. Основные положения [Текст].
49. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения [Текст].
50. ГОСТ 28.001–83. Система технического обслуживания и ремонта техники. Основные положения [Текст].
51. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности [Текст].
52. ГОСТ Р 27.003-2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Руководство по заданию технических требований к надежности [Текст].
53. ГОСТ Р 27.004-2009. Надежность в технике. Модели отказов [Текст].
54. ГОСТ Р 27.301-2011. Надежность в технике. Управление надежностью. техника анализа безотказности. Основные положения [Текст].
55. ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей [Текст].
56. ГОСТ Р 27.403-2009. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной. работы [Текст].
57. ГОСТ Р 27.404-2009. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля коэффициента готовности [Текст].
58. ГОСТ Р 51709–2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки [Текст].
59. ГОСТ Р МЭК 60605-6-2007. Надежность в технике. Критерии проверки постоянства интенсивности отказов и параметра потока отказов [Текст].

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Примеры решения контрольных задач

Относительная частота и вероятность появления события

**Задача 1.** Определить вероятность выпадания “пятерки” или “шестерки” при бросании: а) одной игральной кости; б) двух игральных костей.

а) *Дано:*

Вероятность выпадания “пятерки” при бросании кости  $P(A_5)=1/6$ .

Вероятность выпадания “шестерки” при бросании кости  $P(A_6)=1/6$ .

Определить:  $P(A_5+A_6)$ .

*Решение:*  $P(A_5+A_6)=P(A_5)+P(A_6)-P(A_5\cdot A_6)=1/6+1/6-0=1/3$ .

б) *Дано:*

Вероятность выпадания “пятерки” при бросании первой кости  $P(A_{1-5}) = 1/6$ .

Вероятность выпадания “пятерки” при бросании второй кости  $P(A_{2-5}) = 1/6$ .

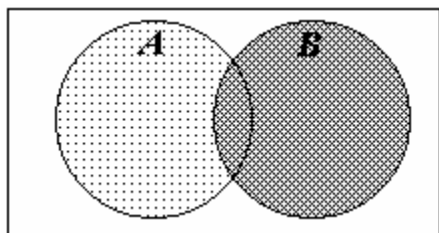
Вероятность выпадания “шестерки” при бросании первой кости  $P(A_{1-6}) = 1/6$ .

Вероятность выпадания “шестерки” при бросании второй кости  $P(A_{2-6}) = 1/6$ .

*Определить:*  $P(A_{1-5} + A_{2-5} + A_{1-6} + A_{2-6})$ .

*Решение:*  $P(A_{1-5} + A_{2-5} + A_{1-6} + A_{2-6}) = P(A_{1-5}) + P(A_{2-5}) + P(A_{1-6}) + P(A_{2-6}) - P(A_{1-5}\cdot A_{2-5}) - P(A_{1-5}\cdot A_{1-6}) - P(A_{1-5}\cdot A_{2-6}) - P(A_{2-5}\cdot A_{1-6}) - P(A_{2-5}\cdot A_{2-6}) - P(A_{1-6}\cdot A_{2-6}) + P(A_{1-5}\cdot A_{2-5}\cdot A_{1-6}) + P(A_{1-5}\cdot A_{2-5}\cdot A_{2-6}) + P(A_{1-5}\cdot A_{1-6}\cdot A_{2-6}) + P(A_{2-5}\cdot A_{1-6}\cdot A_{2-6}) - P(A_{1-5}\cdot A_{2-5}\cdot A_{1-6}\cdot A_{2-6}) = P(A_{1-5}) + P(A_{2-5}) + P(A_{1-6}) + P(A_{2-6}) - P(A_{1-5}\cdot A_{2-5}) - P(A_{1-5}\cdot A_{2-6}) - P(A_{2-5}\cdot A_{1-6}) - P(A_{1-6}\cdot A_{2-6}) = 4\cdot 1/6 - 4\cdot 1/6\cdot 1/6 = 5/9$ .

**Задача 2.** Определить вероятность попадания в зоны *A* и *B* мишени, изображенной на рисунке, если в результате 20 выстрелов число попаданий в зону *A* было равно 6, в зону *B* – 7, в пересечение зон – 2.



*Дано:*

$m_A=6$  выстрелов

$m_B=7$  выстрелов

$N=20$  выстрелов

Определить:  $P(A+B)$ .

*Решение:*  $P(A+B)=P(A)+P(B)-P(AB) = 6/20+7/20-2/20=11/20$ .

**Задача 3.** Техническое устройство состоит из двух, не влияющих друг на друга элементов  $A_1$  и  $A_2$ . Элемент  $A_1$  – основной, элемент  $A_2$  – дублирующий. Определить вероятность отказа устройства, если вероятность отказа каждого из элементов равна 0,5.

Дано:

$$P(A_1) = P(A_2) = 0,5.$$

Определить:  $P(A_1 \cdot A_2)$

$$\text{Решение: } P(A_1 \cdot A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2) = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25.$$

**Задача 4.** Производят три выстрела по одной и той же мишени. Вероятность попадания при первом–третьем выстрелах соответственно равна:  $P_1=0,3$ ;  $P_2=0,6$ ;  $P_3=0,8$ . Определить вероятность хотя бы одного попадания.

Дано:

$$P(A_1) = 0,3;$$

$$P(A_2) = 0,6;$$

$$P(A_3) = 0,8.$$

Определить:  $P_{\text{п}}$ .

Решение:

$$\begin{aligned} P_{\text{п}} = P(A_1 + A_2 + A_3) &= P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) - P(A_1 \cdot A_2) - P(A_1 \cdot A_3) - P(A_2 \cdot A_3) + \\ &+ P(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) - P(A_1)P(A_2) - P(A_1)P(A_3) - P(A_2)P(A_3) + \\ &+ P(A_1)P(A_2)P(A_3) = 0,3 + 0,6 + 0,8 - 0,3 \cdot 0,6 - 0,3 \cdot 0,8 - 0,6 \cdot 0,8 + 0,3 \cdot 0,6 \cdot 0,8 = 0,944. \end{aligned}$$

### Функциональные зависимости и числовые характеристики, используемые при расчетах надежности

**Задача 5.** Функция распределения непрерывной случайной величины  $X$  задана выражением:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0 \\ x^3 & \text{при } 0 < x \leq 1 \\ 1 & \text{при } x > 1 \end{cases}$$

Найти: плотность распределения  $f(x)$ .

Решение:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0 \\ 3x^2 & \text{при } 0 < x \leq 1 \\ 0 & \text{при } x > 1 \end{cases}$$

Задача 6. Плотность распределения случайной величины  $X$  описывается выражением:

$$f(x) = \begin{cases} ax & \text{при } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

*Найти:* математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной величины.

Решение:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \Rightarrow \int_0^1 ax dx = 1 \Rightarrow \frac{a}{2} = 1 \Rightarrow a = 2.$$

Математическое ожидание:

$$M_x = \int_0^1 xf(x) dx = \int_0^1 2x^2 dx = \frac{2}{3}.$$

Дисперсия:

$$D_x = \int_0^1 (x - M_x)^2 f(x) dx = \int_0^1 \left(x - \frac{2}{3}\right)^2 2x dx = 2 \left[ \frac{1}{4} - \frac{4}{9} + \frac{4}{18} \right] = \frac{1}{18}.$$

Среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} = 0,235.$$

Задача 7. Вычислить значение дисперсии  $D_x^*$ , если результаты измерения  $X$  следующие: 1,2; 1,5; 1,9; 2,4; 2,4; 2,5; 2,6; 3,0; 3,5; 3,8.

Решение:

$$D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2,$$

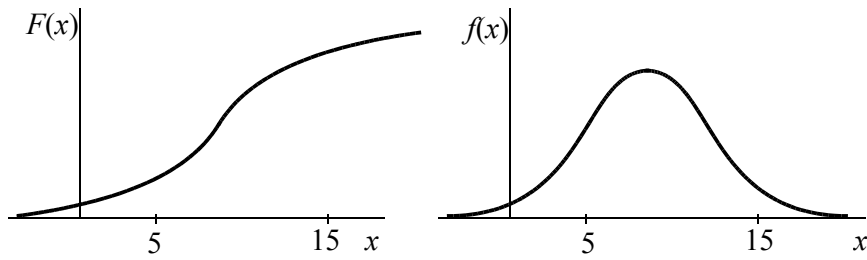
где  $N=10$  – число испытаний;

$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$  – среднее значение величины  $X$ .

$$\bar{X} = \frac{1}{10} (1,2 + 1,5 + 1,9 + 2,4 + 2,5 + 2,6 + 3 + 3,5 + 3,8) = 2,48.$$

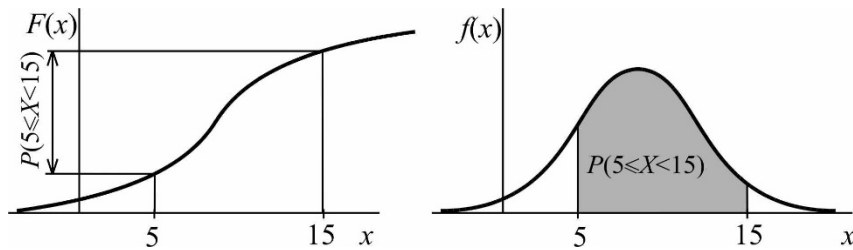


Задача 8. Показать (отобразить) графически  $P(5 \leq X < 15)$ , если графики  $f(x)$  и  $F(x)$  имеют вид:



Решение:  $P(5 \leq X < 15) = F(15) - F(5) = \int_5^{15} f(x) dx$ . Графически это можно

изобразить следующим образом:



### Показатели надежности

Задача 9. На испытания поставлено  $N=200$  изделий. Результаты испытаний приведены в 1-4 столбцах таблицы (см. ниже). Для каждого временного интервала вычислить интенсивность отказов  $\lambda(t)$ . Построить график временной зависимости интенсивности отказов на интервале  $[0; 90[$ .

Требуемые параметры вычисляются по формулам:

$$N_p(t_i) = N, \text{ при } i=1;$$

где  $N_p(t_i)$  – число работоспособных изделий в начале  $i$ -го интервала

$$N_p(t_i) = N_p(t_{i-1}) - \Delta n(t_{i-1}), \text{ при } i=2, 3, \dots, 10,$$

где  $\Delta n(t_{i-1})$  – число отказов в  $(i-1)$ -м интервале

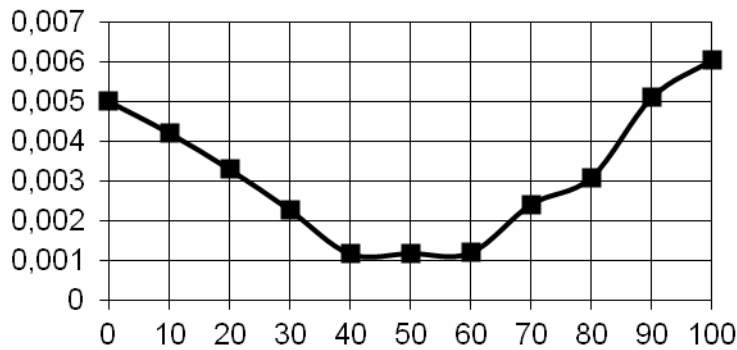
$$\lambda(t_i) = \Delta n(t_i) / (N_p(t_i) \Delta t),$$

где  $\Delta t$  – длина интервала.

Продолжение прил. 1

Порядковый номер интервала $i$	Границы $i$ -го интервала, ч	$t_i$ , ч	$\Delta n(t_i)$	$N_p(t_i)$	$\lambda(t)$ , ч <sup>-1</sup>
1	[0;10[	0	10	200	0,005
2	[10;20[	10	8	190	0,0042
3	[20;30[	20	6	182	0,0033
4	[30;40[	30	4	176	0,0023
5	[40;50[	40	2	172	0,0012
6	[50;60[	50	2	170	0,0012
7	[60;70[	60	2	168	0,0012
8	[70;80[	70	4	166	0,0024
9	[80;90[	80	5	162	0,0031
10	[90;100[	90	8	157	0,0051
11	[100;110[	100	9	149	0,006

$\lambda(t)$ , ч<sup>-1</sup>



$t$ , ч

График временной зависимости интенсивности отказов

**Задача 10.** Определить коэффициент технического использования и коэффициент готовности машин, если известно, что машину эксплуатируют в течение года (8760 ч), на техническое обслуживание и ремонт тратится соответственно 480 и 20 ч.

Дано:

$$t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{ТО}} = 8760 \text{ ч}$$

$$t_{\text{рем}} = 20 \text{ ч}$$

$$t_{\text{ТО}} = 480 \text{ ч}$$

Определить:  $K_{\text{т.и}}$ ,  $K_{\text{г}}$ .

Решение:

$$K_{т.и} = \frac{t_{раб}}{t_{раб} + t_{рем} + t_{ТО}} = \frac{8760 - 20 - 480}{8760} = 0,943;$$

$$K_{Г} = \frac{t_{раб}}{t_{раб} + t_{рем}} = \frac{8760 - 20 - 480}{8760 - 480} = 0,997.$$

Задача 11. При эксплуатации изделий за год (8760 ч) было зафиксировано 5 отказов, на устранение каждого из которых затрачено в среднем 20 ч. Техническое обслуживание в этот период проводилось в течение 240 ч. Определить коэффициенты готовности и технического использования.

Дано:

$$T_э = 8760 \text{ ч}$$

$$m = 5 \text{ отказов}$$

$$T_в = 20 \text{ ч}$$

$$T_{ТО} = 240 \text{ ч}$$

Определить:  $K_{Г}$ ,  $K_{т.и}$ .

Решение:

$$K_{Г} = \frac{t_э - mt_в - t_{ТО}}{t_э - t_{ТО}} = \frac{8760 - 5 \cdot 20 - 240}{8760 - 240} = 0,988;$$

$$K_{т.и} = \frac{t_э - mt_в - t_{ТО}}{t_э} = \frac{8760 - 5 \cdot 20 - 240}{8760} = 0,961.$$

### Законы распределения случайных величин

Задача 12. Определить вероятность безотказной работы и интенсивность отказов подшипника скольжения для наработки  $t_1 = 2 \cdot 10^4$  ч, если ресурс по износу подчиняется нормальному закону распределения с параметрами  $M_t = 4 \cdot 10^4$  ч,  $\sigma = 10^4$  ч.

Решение. Находим квантиль нормированного нормального распределения:

$$x = (t_1 - M_t) / \sigma = (2 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4) / 10^4 = -2.$$

По таблице определяем, что  $F_0(-2) = 0,0228$ . Отсюда

$$P(t_1) = 1 - F_0(x) = 1 - 0,0228 = 0,9772;$$

$$\lambda(t_1) = f(t_1)/P(t_1);$$

где  $f(t_1) = f_0(x)/\sigma = 0,054/10^4 = 5,4 \cdot 10^{-6}$ .

Следовательно,

$$\lambda(t_1) = 5,4 \cdot 10^{-6} / 0,9772 = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

**Задача 13.** Случайная величина  $T$  нормально распределена с математическим ожиданием  $M_t = 20$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma = 2$ . Определить вероятность того, что случайная величина  $T$  находится в диапазоне  $19 \leq T < 22$ .

*Решение:*

$$\begin{aligned} P(19 \leq T < 22) &= P(T < 22) - P(T < 19) = F(22) - F(19) = \\ &= F_0((22 - M_t)/\sigma) - F_0((19 - M_t)/\sigma) = F_0(1) - F_0(-0,5) = \\ &= F_0(1) - 1 + F_0(0,5) = 0,8413 - 1 + 0,6915 = 0,5328. \end{aligned}$$

**Задача 14.** Определить вероятность безотказной работы редуктора в течение  $t = 10^3$  ч, если ресурс распределен логарифмически нормально с параметрами  $\mu = 7,5$ ,  $S = 0,3$ .

*Решение:*

$$x = (\ln t - \mu)/S = (\ln 10^3 - 7,5)/0,3 = -1,97,$$

$$P(t) = 1 - F_0(-1,97) = F_0(1,97) = 0,976.$$

**Задача 15.** Оценить вероятность  $P(t)$  отсутствия внезапных отказов изделия в течение 10000 часов, если наработки до отказа 5 изделий являются следующими:

$$T_1 = 1,2 \cdot 10^8 \text{ ч}; T_2 = 1,0 \cdot 10^8 \text{ ч}; T_3 = 0,8 \cdot 10^8 \text{ ч}; T_4 = 1,1 \cdot 10^8 \text{ ч}; T_5 = 0,9 \cdot 10^8 \text{ ч}.$$

Наработка подчиняется экспоненциальному закону распределения.

*Решение:*

$$\lambda = 1/M_t,$$

$$\text{где } M_t = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^5 t_i}{5} = \frac{(1,2 + 1,0 + 0,8 + 1,1 + 0,9)10^8}{5} = 10^8 \text{ ч}.$$

$$\lambda = 1/10^8 = 10^{-8} \text{ ч}^{-1}.$$

$$P(t) = e^{-\lambda t} = \exp[-10^{-8} \cdot 10^4] = 0,9999.$$

Задача 16. Оценить вероятность безотказной работы  $P(t)$  роликоподшипников в течение  $t=10^4$  ч, если их ресурс распределен по закону Вейбулла с параметрами  $t_0=10^7$ ,  $m=1,5$ .

Решение:

$$P(t) = e^{-\frac{t^m}{t_0}} = e^{-\frac{(10^4)^{1,5}}{10^7}} = 0,905.$$

Задача 17. Пусть проводятся испытания пяти элементов ( $n=5$ ) до тех пор, пока не откажут все элементы; наработки до отказа  $t_1-t_5$  равны соответственно 5; 10; 15; 20 и 25 ч. Нарботка до отказа имеет распределение по экспоненциальному закону с плотностью вероятности  $f(t, \lambda) = \lambda e^{-\lambda t}$ , где  $\lambda$  – параметр распределения.

Найти: оценку параметра  $\lambda$  методом максимального правдоподобия.

Решение. Составим функцию правдоподобия и прологарифмируем ее:

$$L = \lambda^n \exp(-\lambda \sum_{i=1}^n t_i),$$

$$G = \ln L = n \ln \lambda - \lambda \sum_{i=1}^n t_i.$$

Затем частную производную функции  $G$  приравняем к нулю:

$$\frac{dG}{d\lambda} = \frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^n t_i = 0.$$

Решив это уравнение относительно параметра  $\lambda$ , получим его оценку:

$$\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i}. \quad (22.1)$$

Из данной формулы следует, что

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{cp}}},$$

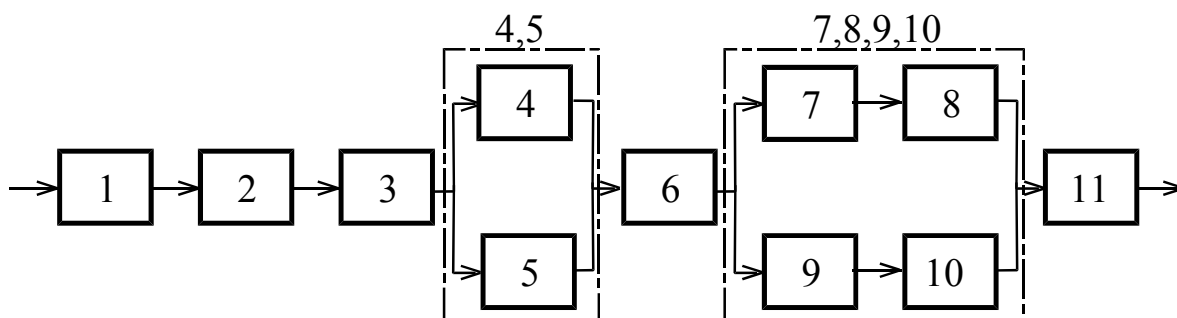
где  $T_{\text{cp}}$  – среднее значение наработки до отказа.

Подставим значения наработок до отказа в формулу (22.1) для определения оценки параметра  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{5}{5 + 10 + 15 + 20 + 25} = 0,067 \text{ ч}^{-1}.$$

Расчет надежности по структурным схемам надежности

Задача 18. Рассчитать вероятность безотказной работы  $P(t)$  системы, состоящей из независимых элементов. Структурная схема системы показана на рисунке.  $P_1(t)=0,9$ ;  $P_2(t)=0,95$ ;  $P_3(t)=0,98$ ;  $P_4(t)=0,81$ ;  $P_5(t)=0,8$ ;  $P_6(t)=0,97$ ;  $P_7(t)=0,92$ ;  $P_8(t)=0,93$ ;  $P_9(t)=0,92$ ;  $P_{10}(t)=0,93$ ;  $P_{11}(t)=0,89$ .



Решение:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot P_{4,5}(t) \cdot P_6(t) + P_{7,8,9,10}(t) \cdot P_{11}(t),$$

где  $P_{4,5}(t)$  – вероятность безотказной работы хотя бы одного элемента – 4-го или 5-го.

$$P_{4,5}(t) = P_4(t) + P_5(t) - P_4(t) P_5(t).$$

Аналогично

$$P_{7,8,9,10}(t) = P_7(t)P_8(t) + P_9(t)P_{10}(t) - P_7(t)P_8(t)P_9(t)P_{10}(t).$$

$$P(t) = 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,98 \cdot (0,81 + 0,8 - 0,81 \cdot 0,8) \cdot 0,97 \cdot (0,92 \cdot 0,93 + 0,92 \cdot 0,93 - 0,92 \cdot 0,93 \cdot 0,92 \cdot 0,93) \cdot 0,89 = 0,681.$$

Задача 19. Интенсивность отказов шин автомобиля вследствие прокола равна  $\lambda = 10^{-3} \text{ км}^{-1}$ . Определить вероятность  $P(300)$  300-километрового пробега при отсутствии запасной шины и вероятность  $P_{\text{зап}}(300)$  при ее наличии.

Решение. При отсутствии запасного колеса структурная схема надежности системы колес выглядит следующим образом:



$$P(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t) = (e^{-\lambda t})^4,$$

где  $P_1(t) = P_2(t) = P_3(t) = P_4(t) = e^{-\lambda t}$ .

$$P(t) = (e^{-10^{-3} \cdot 300})^4 = 0,3.$$

При наличии запасного колеса вероятность безотказной работы определяется как вероятность того, что хотя бы четыре колеса из пяти останутся целыми.

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) P_3(t) P_4(t) \cdot P_5(t) + P_1(t) P_2(t) P_3(t) P_4(t) \cdot [1 - P_5(t)] + P_1(t) P_2(t) P_3(t) \cdot [1 - P_4(t)] P_5(t) + P_1(t) P_2(t) \cdot [1 - P_3(t)] P_4(t) P_5(t) + P_1(t) \cdot [1 - P_2(t)] P_3(t) P_4(t) P_5(t) + P_1(t) \cdot [1 - P_1(t)] P_2(t) P_3(t) P_4(t) P_5(t)$$

$$+ P_1(t) \cdot [1 - P_2(t)] P_3(t) P_4(t) P_5(t) + [1 - P_1(t)] P_2(t) P_3(t) P_4(t) P_5(t) =$$

$$= P_1^5 + 5P_1^4(1 - P_1) = 5P_1^4 - 4P_1^5 = 5e^{-4\lambda t} - 4e^{-5\lambda t} = 0,613.$$

**Задача 20.** Система связи спроектирована таким образом, что при имеющихся пяти каналах связь обеспечивается при исправном состоянии любых двух каналов. Надежность передачи по всем каналам одинакова и обеспечивается с вероятностью безотказной работы  $P=0,9$ . Вычислить вероятность безотказной работы системы связи.

*Решение.* Так как система связи представляет собой систему типа "2 из 5", то вероятность безотказной работы этой системы равна:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k P^k (1 - P)^{n-k},$$

где  $P$  – вероятность безотказной работы одного элемента (канала);

$m$  – число исправных элементов, при котором обеспечивается работоспособность системы;

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!} - \text{число сочетаний из } n \text{ элементов по } k.$$

$$P(t) = 1 - \sum_{k=0}^1 C_5^k P^k (1 - P)^{5-k} = 1 - [C_5^0 (1 - P)^5 + C_5^1 P (1 - P)^4] =$$

$$= 1 - (0,1^5 + 5 \cdot 0,9 \cdot 0,1^4) = 0,99954.$$

**Задача 21.** Резервированная система управления состоит из  $n = 5000$  элементов. Для повышения надежности системы предполагается провести общее дублирование элементов.

Чтобы приближенно оценить возможность достижения заданной вероятности безотказной работы системы  $P_c(t) = 0,9$  при  $t = 10$  ч, необходимо рассчитать среднюю интенсивность отказов одного элемента при экспоненциальном законе распределения наработки до отказа каждого элемента.

*Решение.* Вероятность безотказной работы системы при общем дублировании и равнонадежных элементах равна:

$$P_c(t) = 1 - [1 - P^n(t)]^2,$$

где  $P(t) = e^{-\lambda t}$  – вероятность безотказной работы одного элемента.

Так как должно быть

$$1 - [1 - P^n(t)]^2 \geq 0,9,$$

то 
$$P^n(t) \leq 1 - \sqrt{1 - 0,9} \rightarrow P^n(t) \leq 0,6838.$$

Учитывая, что  $P(t) = e^{-\lambda t}$ , получим:

$$e^{-n\lambda t} \leq 0,6838 \rightarrow \lambda \leq -\frac{\ln 0,6838}{nt} \rightarrow \lambda \leq 7,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Задача 22. Устройство обработки состоит из трех одинаковых блоков. Вероятность безотказной работы устройства  $P_y(t_1)$  в течение  $(0, t_1)$  должна быть не менее 0,9. Определить, какова должна быть вероятность безотказной работы каждого блока в течение  $(0, t_1)$  для случаев: а) резерв отсутствует ( $P(t_1)$ ); б) имеется общее нагруженное резервирование всего устройства в целом ( $P_{\text{общ}}(t_1)$ ); в) имеется раздельное нагруженное резервирование каждого элемента ( $P_{\text{разд}}(t_1)$ ).

а) Резерв отсутствует

$$P_y(t_1) = P^3(t_1) \rightarrow P(t_1) = \sqrt[3]{P_y(t_1)}$$

т.к.  $P_y(t_1) \geq 0,9$ , то  $P(t_1) \geq 0,9655$

б) Имеется общее нагруженное резервирование всего устройства в целом

$$P_y(t_1) = 1 - (1 - P_{\text{общ}}^3(t_1))^2 \rightarrow P_{\text{общ}}(t_1) = \sqrt[3]{1 - \sqrt{1 - P_y(t_1)}}$$

т.к.  $P_y(t_1) \geq 0,9$ , то  $P_{\text{общ}}(t_1) \geq 0,8810$

в) имеется раздельное нагруженное резервирование каждого элемента

$$P_y(t_1) = (1 - (1 - P_{\text{разд}}(t_1))^2)^3 \rightarrow P_{\text{разд}}(t_1) = 1 - \sqrt{1 - \sqrt[3]{P_y(t_1)}}$$

т.к.  $P_y(t_1) \geq 0,9$ , то  $P_{\text{разд}}(t_1) \geq 0,8142$ .

### Контроль надежности систем по результатам испытаний

Задача 23. Определить нижнюю границу доверительного интервала при доверительной вероятности  $\alpha=0,7$ , если при испытании десяти изделий ни одно не отказало.

*Решение.* Для подтверждения того, что  $\text{Вер}(P_H \leq P) = \alpha$ , необходимо испытать

$n = \frac{\lg(1 - \alpha)}{\lg P_H}$  изделий при условии, что отказов при испытании не возникнет.

Отсюда

$$P_H = 10^{\frac{\lg(1-\alpha)}{n}} = \sqrt[n]{1-\alpha} = \sqrt[10]{1-0,7} = 0,887.$$

Задача 24. Проводится оценка надежности по отсутствию отказов. Какое число  $n$  изделий необходимо оценить для подтверждения с доверительной вероятностью  $\alpha=0,9$  того, что вероятность безотказной работы выше 0,95.

*Решение:*

$$n = \frac{\lg(1 - \alpha)}{\lg P_H} = \frac{\lg(1 - 0,9)}{\lg 0,95} = 45.$$



## Контрольная работа «Расчет надежности системы»

Задание на контрольную работу (КР) содержит в качестве исходных данных структурную схему надежности технической системы и интенсивность отказов ее элементов. Студенту требуется составить расчетные формулы для определения показателей надежности системы для различных значений наработки  $t$  и графически изобразить вероятность безотказной работы  $P(t)$  как функцию наработки.

Поскольку заданная схема надежности является комбинированной, ее следует подвергнуть декомпозиции. Далее, вводя соответствующие квазиэлементы, преобразовываем исходную схему к простейшему виду и, используя соответствующие формулы, для ряда значений наработки  $t$  в предположении простейшего потока отказов вычисляем значения вероятностей безотказной работы элементов и всей системы в целом. При этом необходимо привести все промежуточные преобразования исходной схемы, конкретные расчетные формулы с их обоснованием, а результаты расчета представить в виде таблицы, в которой по столбцам изменяется значение наработки  $t$ , а по строкам в столбцах приводятся вычисленные значения вероятностей безотказной работы элементов и всей системы в целом, полученные по рабочим формулам. При этом диапазон значений наработки  $t$  должен обеспечить диапазон значений вероятности безотказной работы системы от 0,2 до 1,0 и содержать 7 значений аргумента.

После этого строится график зависимости  $P(t)$  по результатам расчета. Из него графически по заданному значению  $\gamma$  определяется  $\gamma$ -процентная наработка системы  $T_\gamma$ .

По заданию требуется за счет повышения надежности элементов и за счет структурного резервирования увеличить  $\gamma$ -процентную наработку исходной системы в 1,5 раза, т.е. обеспечить  $\gamma$ -процентную наработку

$$T_{\gamma \text{ треб}} = 1,5 T_\gamma.$$

Другими словами, для выполнения задания необходимо обеспечить вероятность безотказной работы системы  $P_{S_{\text{над}}}(T_{\gamma \text{ треб}}) \geq \gamma$  (за счет повышения надежности элементов системы) и  $P_{S_{\text{рез}}}(T_{\gamma \text{ треб}}) \geq \gamma$  (за счет резервирования системы) в течение наработки  $t = T_{\gamma \text{ треб}} = 1,5 T_\gamma$ . Для этого следует выполнить расчет вероятности безотказной работы элементов и всей системы за время  $T_{\gamma \text{ треб}}$  и занести полученные данные в соответствующий столбец таблицы. Зная вероятности безотказной работы всех элементов схемы и требуемое значение  $\gamma$ , легко определить, какую вероятность безотказной работы за время  $T_{\gamma \text{ треб}}$  должен иметь элемент, избранный для модернизации.

Для модернизации системы, заключающейся в повышении надежности ее элементов без изменения структуры системы, необходимо определить интенсивности отказов элементов, при которых обеспечивается требуемое значение  $T_{\gamma \text{ треб}}$   $\gamma$ -процентной наработки до отказа. Это можно осуществить графоаналитическим методом, построив график зависимости вероятности безотказной работы системы или квазиэлемента от вероятности безотказной работы элементов. Из построенного по этим данным графика можно определить необходимую интенсивность отказов элементов, при которых  $P_{S_{\text{над}}}(T_{\gamma \text{ треб}}) \geq \gamma$ .

Для модернизации системы, заключающейся в резервировании системы без изменения надежности составляющих ее элементов, нужно выбрать, какие элементы и как следует резервировать для достижения наибольшего эффекта. Для дальнейших расчетов необходимо определить кратность резервирования  $l$ . *Кратность резервирования* – это отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов, выраженное несокращаемой дробью (например, 2:3; 4:2). Для решения задачи нужно последовательно увеличивать кратность резервирования, начиная с единицы, каждый раз по соответствующим формулам определять величину вероятности безотказной работы системы  $P_{S_{\text{рез}}}(T_{\gamma \text{ треб}})$  в течение времени  $T_{\gamma \text{ треб}}$  до тех пор, пока не будет обеспечено необходимое значение  $P_{S_{\text{рез}}}(T_{\gamma \text{ треб}}) = \gamma$ . Модернизованную структуру с резервированием следует привести в ходе оформления контрольной работы.

Для построения зависимостей  $P_{S_{\text{над}}}(t)$  и  $P_{S_{\text{рез}}}(t)$  удобно дополнить ранее составленную таблицу соответствующими строками. Графики этих зависимостей следует изобразить совместно с кривой  $P_S(t)$ .

Рекомендуется для выполнения расчетов и отображения полученных результатов в виде таблиц и графиков использовать программу *Excel*.

### Исходные данные к контрольной работе

В соответствии с вариантом задания по структурной схеме надежности, приведенной ниже, по значению вероятности безотказной работы системы  $\gamma$  в течение наработки  $T_{\gamma}$  ( $\gamma$ -процентной наработки) и по значениям интенсивностей отказов ее элементов  $\lambda_i$  (табл. I) требуется:

1. Построить график временной зависимости вероятности безотказной работы системы в диапазоне от 0,2 до 1,0.
2. Определить  $\gamma$ -процентную наработку технической системы.
3. Обеспечить увеличение  $\gamma$ -процентной наработки не менее, чем в 1,5 раза за счет:
  - а) повышения надежности элементов исходной системы;
  - б) структурного резервирования элементов исходной системы.

Продолжение прил. 2

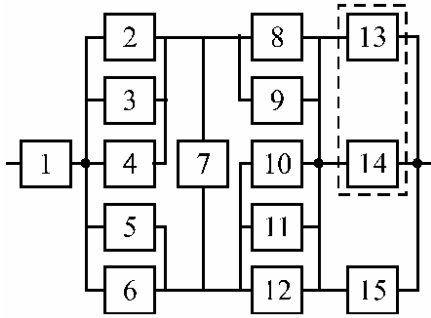
4. Построить графики временных зависимостей  $P_{\text{Снад}}(t)$  и  $P_{\text{Срез}}(t)$  – вероятностей безотказной работы системы после модернизации в соответствии с пп. 3,а и 3,б.

Таблица I

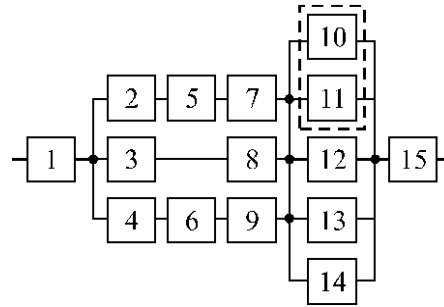
Заданные значения показателей надежности

№ вар.	$\gamma$ , %	Интенсивности отказов элементов, $\lambda_{i,} \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	90	0,1	1	1	1	1	1	0,5	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1
2	95	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	0,1
3	80	0,1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	5	5	5	0,2
4	70	0,05	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,02
5	50	0,01	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1
6	75	0,01	0,05	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1	0,05	0,05	0,1	–
7	65	0,05	0,5	0,5	0,5	0,5	0,05	0,05	0,05	0,01	0,01	0,1	0,2	0,2	0,1	–
8	85	0,1	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,01	0,01	0,01	0,5	0,5	0,5	0,1	–
9	60	0,03	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	1	1	1	0,03	0,03	0,03	0,1	–
10	50	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	0,1	–
11	75	0,05	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1
12	65	0,02	0,1	0,1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	0,1	0,1	0,05
13	70	0,01	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,1	–
14	50	0,01	0,1	0,1	10	10	10	10	0,2	0,2	10	10	10	0,5	0,5	0,5
15	85	0,01	1	1	5	5	5	5	5	0,2	0,2	5	5	5	0,1	–
16	80	0,1	1	1	2	1	1	5	5	5	3	3	3	1	1	0,05
17	95	0,1	5	5	1	5	5	10	10	5	5	5	1	1	1	0,2
18	60	0,01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,1	–
19	75	0,1	5	5	0,5	5	5	1	3	3	1	5	5	0,5	5	5
20	90	0,1	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20	10	10	10	10
21	90	0,1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	2	2	0,5	0,2	0,2	0,5	0,2
22	80	1	1	1	1	1	0,2	0,5	0,5	1	0,5	1	1	1	1	0,1
23	70	0,5	1	1,5	0,5	1	1	1	1,5	0,5	1,5	1,5	3	3	0,1	0,1
24	60	1	2	2	2	4	2	2	2	4	5	5	5	5	1	1
25	50	0,5	10	10	10	10	0,5	5	5	5	5	0,8	5	1	1	5
26	60	1	1	2	2	3	5	5	5	5	2	2	5	5	5	1
27	70	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1	1,5	1
28	80	1	2	2	2	2	2	5	5	5	5	5	2	1	1	1
29	90	0,5	2	2	2	2	5	5	5	5	3	3	3	3	1	1
30	80	2	1	2	1	5	5	2	5	5	2	1	2	1	2	1
31	70	2	1	2	1	5	5	2	5	5	2	1	2	1	2	1
32	60	5	5	2	2	2	5	5	1	1	2	2	3	3	1	1
33	60	1	2	3	3	4	2	2	3	3	3	5,5	5,5	5,5	0,2	0,5
34	90	0,6	0,3	0,3	0,6	0,6	0,3	0,3	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1
35	95	1	2	2	1	1	2	2	1	5	5	5	5	5	5	5
36	80	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
37	70	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2
38	90	3	3	3	2	2	1	1	2	2	3	2	2	2	2	2
39	90	8	8	8	8	3	3	3	3	5	5	5	5	2	2	2
40	80	2	2	2	2	5	5	8	2	2	2	2	5	5	8	8

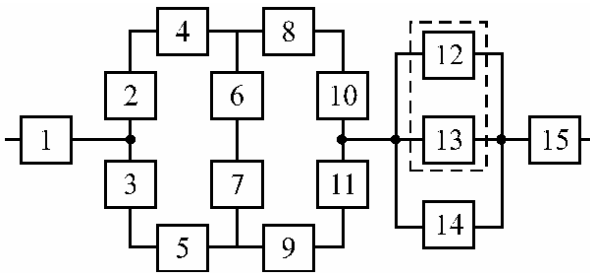
Все элементы системы работают в режиме нормальной эксплуатации (простейший поток отказов). Резервирование отдельных элементов или групп элементов осуществляется идентичными по надежности резервными элементами или группами элементов. Переключатели при резервировании считаются идеальными.



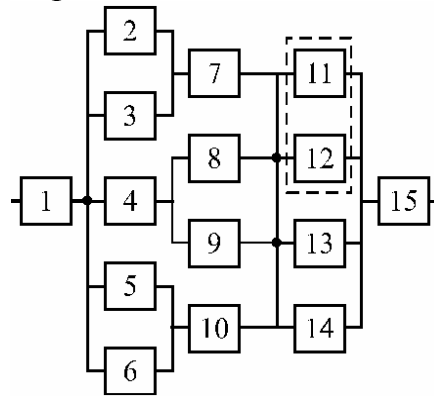
Вариант 1



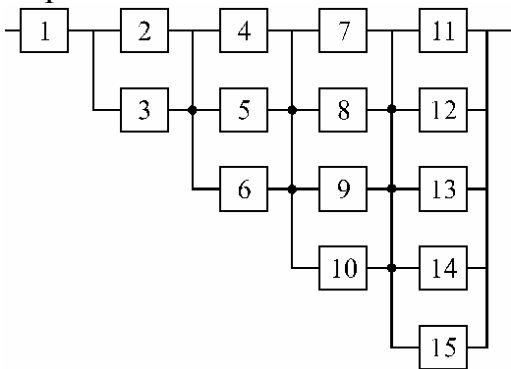
Вариант 2



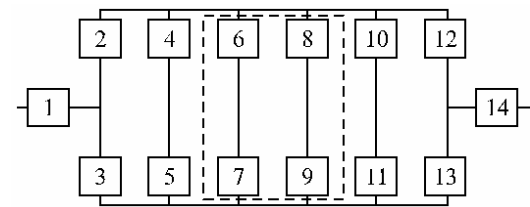
Вариант 3



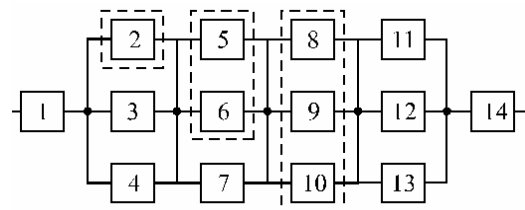
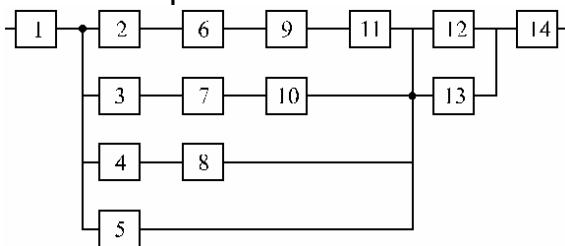
Вариант 4



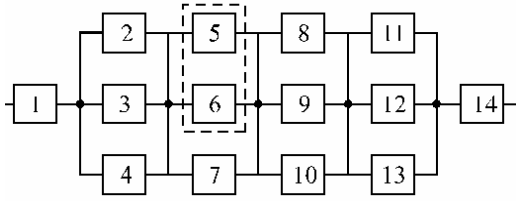
Вариант 5



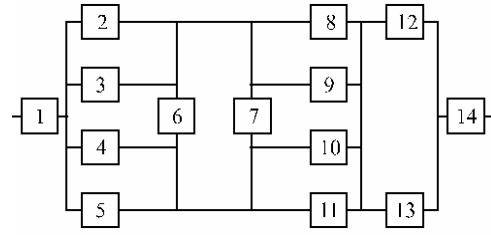
Вариант 6



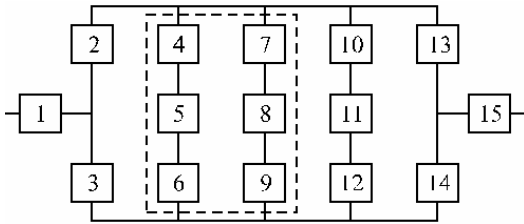
Вариант 7



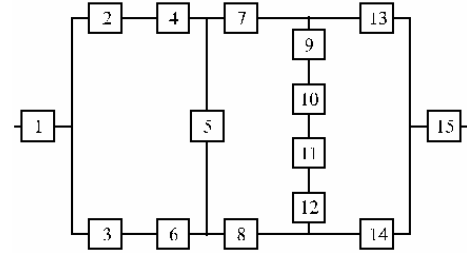
Вариант 8



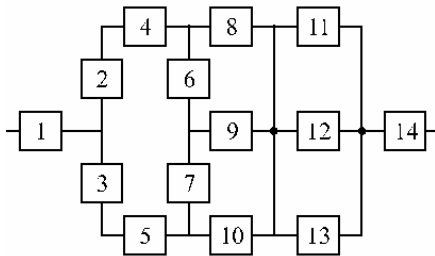
Вариант 9



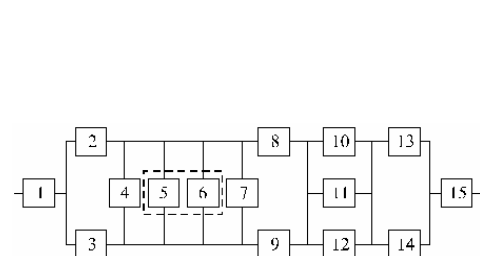
Вариант 10



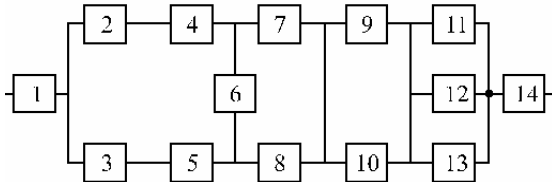
Вариант 11



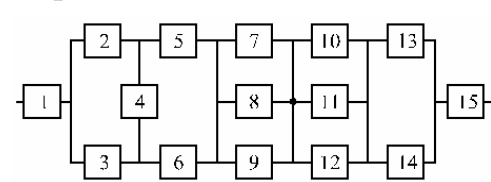
Вариант 12



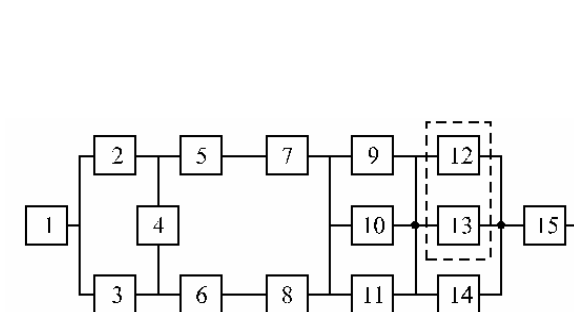
Вариант 13



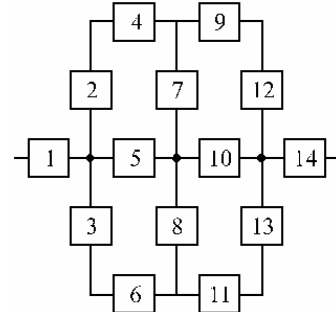
Вариант 14



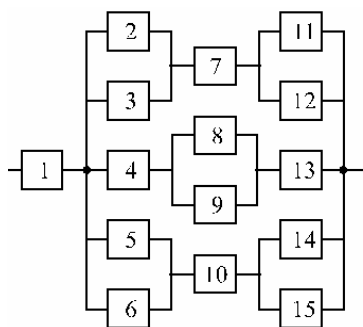
Вариант 15



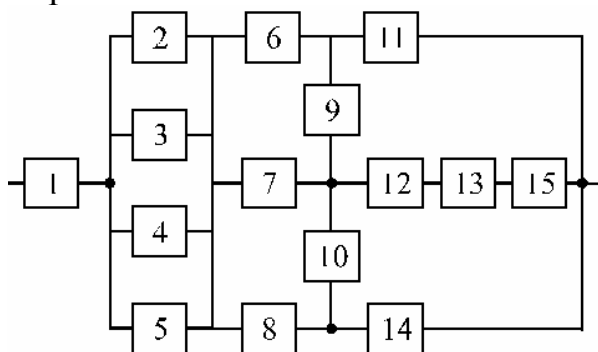
Вариант 16



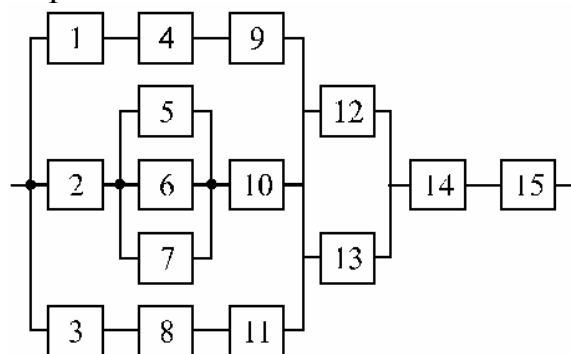
Вариант 17



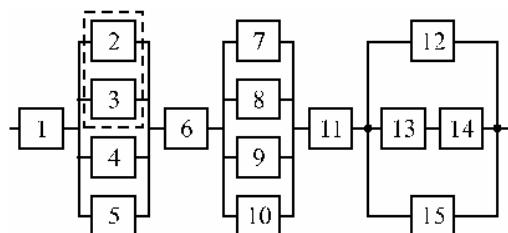
Вариант 19



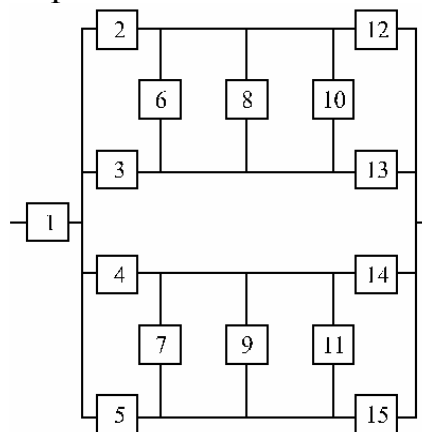
Вариант 21



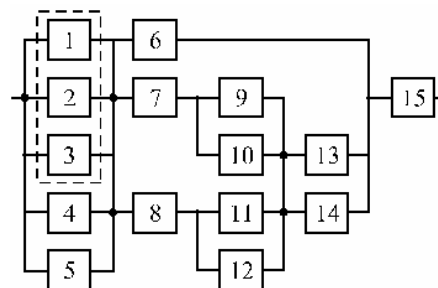
Вариант 23



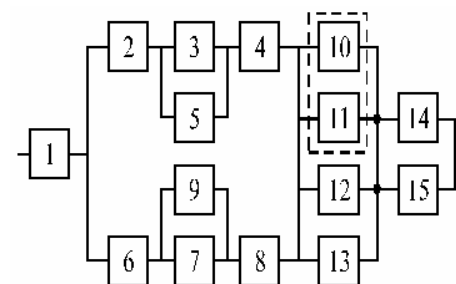
Вариант 18



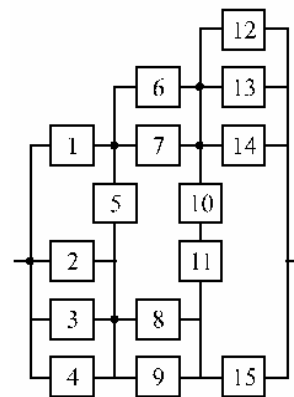
Вариант 20



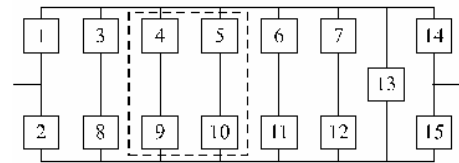
Вариант 22



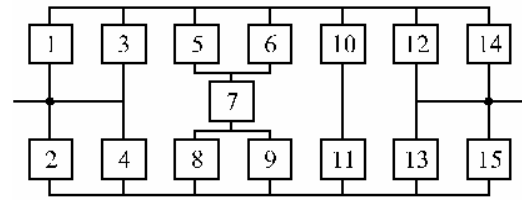
Вариант 24



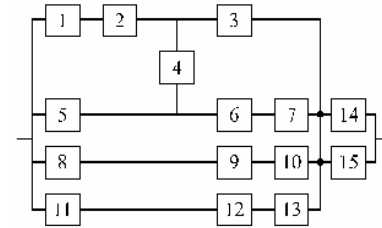
Вариант 26



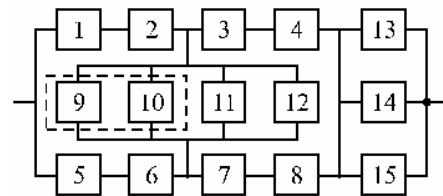
Вариант 28



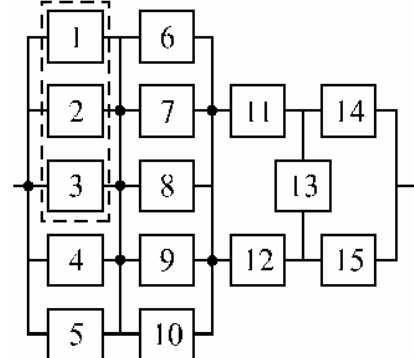
Вариант 30



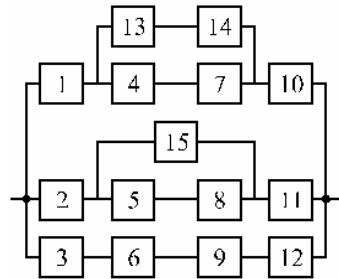
Вариант 32



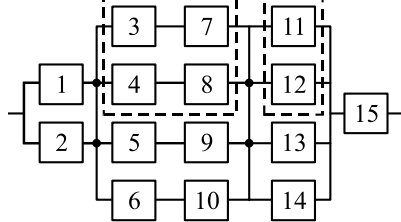
Вариант 34



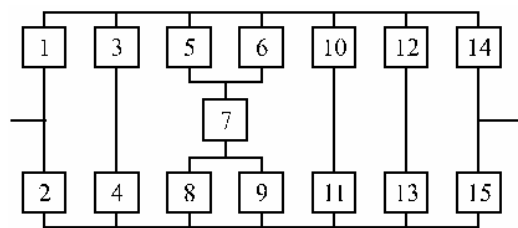
Вариант 25



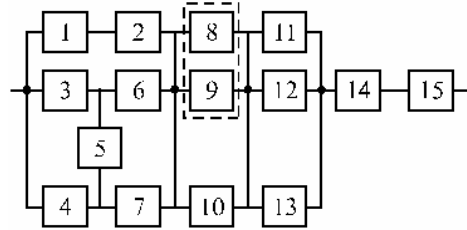
Вариант 27



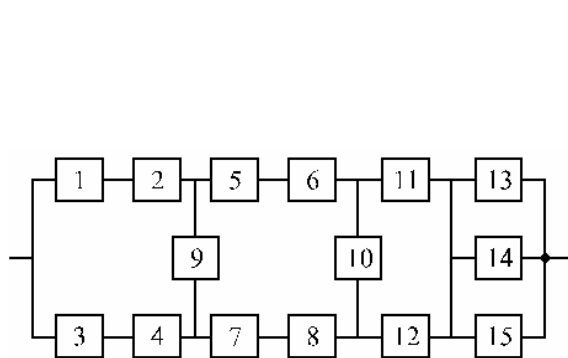
Вариант 29



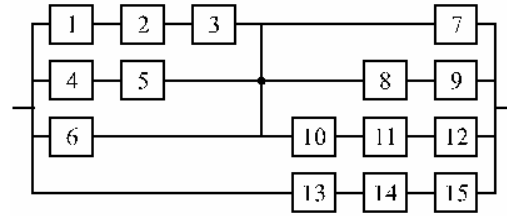
Вариант 31



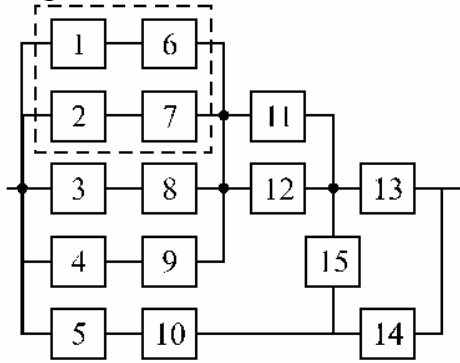
Вариант 33



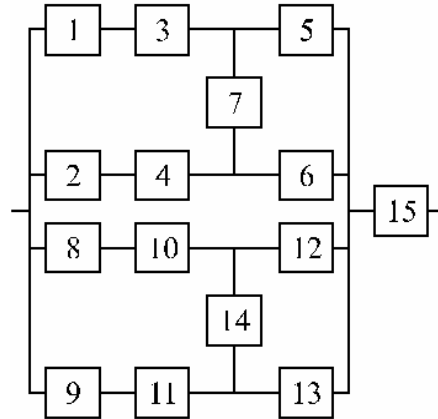
Вариант 36



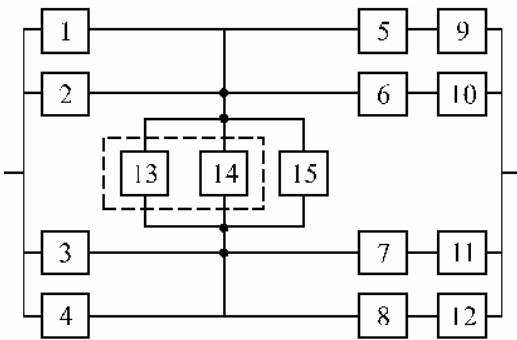
Вариант 35



Вариант 38



Вариант 37

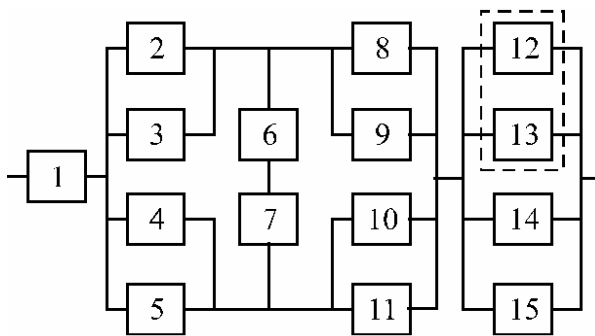


Вариант 40

Вариант 39

Пример выполнения контрольной работы

Исходные данные



- $\lambda_1=0,001 \text{ ч}^{-1}$
- $\lambda_2=\lambda_3=\lambda_4=\lambda_5=0,1 \text{ ч}^{-1}$
- $\lambda_6=\lambda_7=0,01 \text{ ч}^{-1}$
- $\lambda_8=\lambda_9=\lambda_{10}=\lambda_{11}=0,2 \text{ ч}^{-1}$
- $\lambda_{12}=\lambda_{13}=\lambda_{14}=\lambda_{15}=0,5 \text{ ч}^{-1}$
- $\gamma=50 \%$

Рис. I. Исходная структурная схема надежности системы

Преобразуем исходную схему, заменив ее элементы квазиэлементами. Преобразованная схема представлена на рис. II.

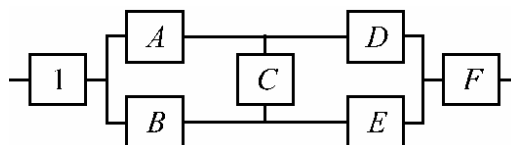


Рис. II. Преобразованная схема



Элемент  $A$  преобразованной схемы заменяет элементы 2 и 3 исходной схемы. Учитывая, что  $P_2=P_3$ , а элементы 2 и 3 соединены параллельно, вероятность безотказной работы элемента  $A$  равна:

$$P_A = 1 - Q_2 Q_3 = 1 - Q_2^2 = 1 - (1 - P_2)^2. \quad (1)$$

Элементы 4 и 5 также образуют параллельное соединение, заменив которое элементом  $B$  и учитывая, что  $P_4=P_5$ , получим:

$$P_B = 1 - Q_4 Q_5 = 1 - Q_4^2 = (1 - P_4)^2. \quad (2)$$

Элементы 6 и 7 в исходной схеме соединены последовательно. Заменяем их элементом  $C$ , для которого при  $P_6=P_7$

$$P_C = P_6 P_7 = P_6^2. \quad (3)$$

Элементы 8 и 9 образуют параллельное соединение. Заменяем их элементом  $D$ , для которого при  $P_8=P_9$ , получим:

$$P_D = 1 - Q_8 Q_9 = 1 - Q_8^2 = 1 - (1 - P_8)^2. \quad (4)$$

Элементы 10 и 11 с параллельным соединением заменяем элементом  $E$ . Так как  $P_{10}=P_{11}$ , то

$$P_E = 1 - Q_{10} Q_{11} = 1 - Q_{10}^2 = 1 - (1 - P_{10})^2. \quad (5)$$

Элементы 12, 13, 14 и 15 образуют соединение “2 из 4”, которое заменяем элементом  $F$ . Так как  $P_{12}=P_{13}=P_{14}=P_{15}$ , то для определения вероятности безотказной работы элемента  $F$  можно воспользоваться комбинаторным методом (см. подразд. 3.3):

$$\begin{aligned} P_F &= \sum_{k=2}^4 C_4^k P_{12}^k (1 - P_{12})^{4-k} = \\ &= \frac{4!}{2!2!} P_{12}^2 (1 - P_{12})^2 + \frac{4!}{3!1!} P_{12}^3 (1 - P_{12}) + \frac{4!}{4!0!} P_{12}^4 = \\ &= 6P_{12}^2 (1 - P_{12})^2 + 4P_{12}^3 (1 - P_{12}) + P_{12}^4 = 6P_{12}^2 - 8P_{12}^3 + 3P_{12}^4. \end{aligned} \quad (6)$$

Элементы  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $E$  образуют (см. рис. II) мостиковую систему, которую можно заменить элементом  $G$ . Для расчета вероятности безотказной работы воспользуемся теоремой о разложении функции логики по одному аргументу. В качестве особого элемента выберем элемент  $C$ , так как в этом случае мостиковая схема преобразуется в наиболее простые схемы надежности. Тогда

$$P_G = P_C P_G(P_C=1) + Q_C P_G(P_C=0), \quad (7)$$

где  $P_G(P_C=1)$  – вероятность безотказной работы мостиковой схемы при абсолютно надежном элементе  $C$  (рис. III, а),

$P_G(P_C=0)$  – вероятность безотказной работы мостиковой схемы при отказавшем элементе  $C$  (рис. III, б).

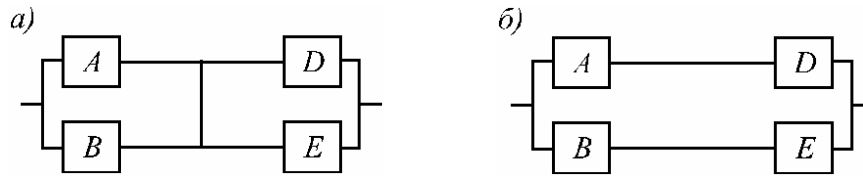


Рис. III. Структурные схемы надежности мостиковой схемы (рис. II) при абсолютно надежном (а) и отказавшем (б) элементе С

Учитывая, что  $P_A=P_B, P_D=P_E$ , получим:

$$\begin{aligned}
 P_G &= P_C [1 - (1 - P_A)(1 - P_B)] \cdot [1 - (1 - P_D)(1 - P_E)] + \\
 &+ (1 - P_C) [1 - (1 - P_A P_D)(1 - P_B P_E)] = \\
 &= P_C [1 - (1 - P_A)^2] \cdot [1 - (1 - P_D)^2] + (1 - P_C) [1 - (1 - P_A P_D)^2] \quad (8)
 \end{aligned}$$

Полученная в результате преобразований схема изображена на рис. IV.

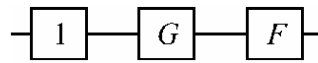


Рис. IV. Преобразованная структурная схема надежности

В преобразованной схеме элементы  $1, G$  и  $F$  образуют последовательное соединение. Поэтому вероятность  $P_S$  безотказной работы всей системы  $S$ :

$$P_S = P_1 P_G P_F \quad (9)$$

Так как по условию все элементы системы работают в период нормальной эксплуатации, то вероятность безотказной работы элементов с 1 по 15 подчиняются экспоненциальному закону:

$$P_i = \exp(-\lambda_i t) \quad (10)$$

Результаты расчетов вероятностей безотказной работы элементов 1–15 исходной схемы по формуле (10) для наработки от 0 до  $3 \cdot 10^6$  часов представлены в табл. II.

Результаты расчетов вероятностей безотказной работы элементов  $A, B, C, D, E, F$  и  $G$  по формулам (1)...(6) и (8) также приведены в табл. II.

14. На рис. V показан график зависимости вероятности безотказной работы системы  $P_S$  от времени (наработки)  $t$ .

15. По графику (см. рис. V, кривая  $P_S$ ) находим для  $\gamma=50\%$   $\gamma$ -процентную наработку системы  $T_\gamma = 1,9 \cdot 10^6$  ч.

Проверочный расчет при  $t = 1,9 \cdot 10^6$  ч показывает (см. табл. II), что  $P_S(T_\gamma) \approx 0,5$ .

17. По условиям задания требуется обеспечить  $\gamma$ -процентную наработку системы до отказа  $T_{\gamma \text{ треб}} = 1,5 T_\gamma = 1,5 \cdot 1,9 \cdot 10^6 = 2,85 \cdot 10^6$  ч.

18. Расчет показывает (см. табл. II), что при  $t = 2,85 \cdot 10^6$  ч для элементов преобразованной схемы (см. рис. IV)  $P_1 = 0,9972, P_G = 0,9594$  и  $P_F = 0,2458$ . Следовательно, из трех последовательно соединенных элементов мини-

мальное значение вероятности безотказной работы имеет элемент  $F$  и именно увеличение его надежности даст максимальное увеличение надежности системы в целом.

19. Для того чтобы при  $T_{\gamma \text{ треб}}=2,85 \cdot 10^6$  ч система в целом имела вероятность безотказной работы  $P_{S_{\text{над}}}(T_{\gamma \text{ треб}}) \geq \gamma$ , необходимо, чтобы элемент  $F$  имел вероятность безотказной работы (см. формулу (9))

$$P_F \geq \frac{\gamma}{100P_1P_G}, \quad (11)$$

где  $\frac{\gamma}{100P_1P_G} = \frac{50}{100 \cdot 0,9972 \cdot 0,9597} = 0,5226$ .

20. Для определения минимально необходимых вероятностей безотказной работы  $P_{12_{\text{над}}} \dots P_{15_{\text{над}}}$  элементов 12...15 необходимо решить уравнение (6) относительно  $P_{12}$  при  $P_F=0,5226$ . Так как аналитическое решение этого уравнения связано с определенными трудностями, целесообразнее использовать графоаналитический метод определения  $P_{12}$ . Для этого по данным табл. II строим график зависимости  $P_F=f(P_{12})$ , представленный на рис. VI. По графику при  $P_F=0,5226$  находим  $P_{12_{\text{над}}} \approx 0,4$ .

Таблица II

Вероятности безотказной работы системы и ее элементов

Элементы и системы	$\lambda_{i_s} \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	Наработка $t, \times 10^6$ ч							
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	1,9 ( $T_\gamma$ )	2,85 ( $T_{\gamma \text{ треб}}$ )
1	0,001	0,9995	0,9990	0,9985	0,9980	0,9975	0,9970	0,9981	0,9972
2 – 5	0,1	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408	0,8270	0,7520
6,7	0,01	0,9950	0,9900	0,9851	0,9802	0,9753	0,9704	0,9812	0,9719
8 – 11	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,6839	0,5655
12 – 15	0,5	0,7788	0,6065	0,4724	0,3679	0,2865	0,2231	0,3867	0,2405
$A, B$	–	0,9976	0,9909	0,9806	0,9671	0,9511	0,9328	0,9701	0,9385
$C$	–	0,9900	0,9802	0,9704	0,9608	0,9512	0,9418	0,9627	0,9446
$D, E$	–	0,9909	0,9671	0,9328	0,8913	0,8452	0,7964	0,9001	0,8112
$F$	–	0,9639	0,8282	0,6449	0,4687	0,3246	0,2173	0,5018	0,2458
$G$	–	0,9999	0,9988	0,9950	0,9869	0,9731	0,9531	0,9889	0,9597
$S$	–	0,9633	0,8264	0,6408	0,4616	0,3151	0,2065	<b>0,4953</b>	0,2352
$12_{\text{над}} - 15_{\text{над}}$	0,322	0,8513	0,7247	0,6169	0,5252	0,4471	0,3806	0,5424	0,3994
$F_{\text{над}}$	–	0,9883	0,9338	0,8397	0,7243	0,6043	0,4910	0,7482	0,5238
$S_{\text{над}}$	–	0,9877	0,9317	0,8343	0,7134	0,5865	0,4666	0,7385	<b>0,5013</b>
$16_{\text{над}} - 18_{\text{над}}$	0,5	0,7788	0,6065	0,4724	0,3679	0,2865	0,2231	0,3867	0,2405
$F_{\text{рез}}$	–	0,9993	0,9828	0,9173	0,7954	0,6413	0,4859	0,8234	0,5311
$S_{\text{рез}}$	–	0,9987	0,9807	0,9114	0,7834	0,6225	0,4617	0,8127	<b>0,5083</b>

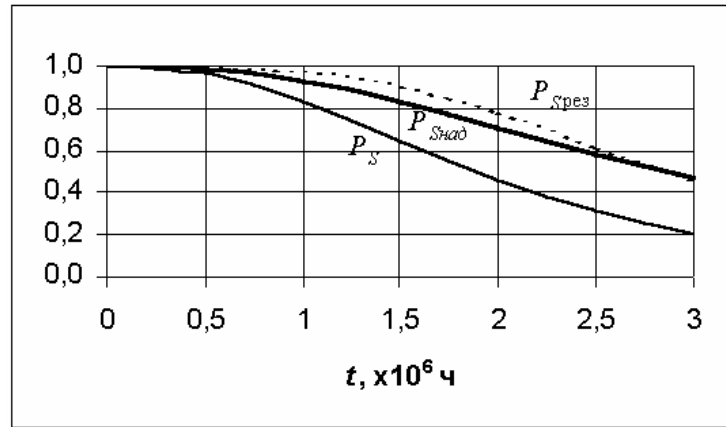


Рис. V. Вероятности безотказной работы исходной системы ( $P_S$ ), системы, состоящей из элементов с повышенной надежностью ( $P_{S_{над}}$ ), и системы со структурным резервированием элементов ( $P_{S_{рез}}$ )

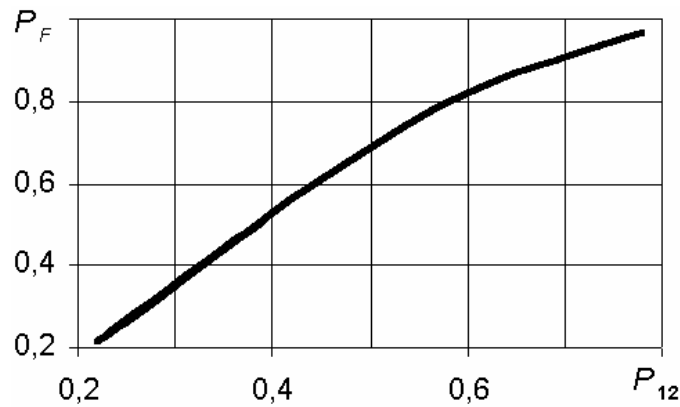


Рис. VI. Зависимость вероятности безотказной работы квазиэлемента  $F$  от вероятности безотказной работы его элементов

Так как по условиям задания все элементы работают в период нормальной эксплуатации и подчиняются экспоненциальному закону (см. (10)), то для элементов 12...15 при  $t=T_{\gamma \text{ треб}}=2,85 \cdot 10^6 \text{ ч}^{-1}$  находим

$$\begin{aligned} \lambda_{12 \text{ над}} = \lambda_{13 \text{ над}} = \lambda_{14 \text{ над}} = \lambda_{15 \text{ над}} &= -\frac{\ln P_{12}}{T_{\gamma \text{ треб}}} = \\ &= -\frac{\ln 0,4}{2,85 \cdot 10^6} = 0,322 \cdot 10^6 \text{ ч}^{-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, для увеличения  $\gamma$ -процентной наработки системы до отказа необходимо снизить интенсивность отказов элементов 12, 13, 14 и 15 с 0,5 до  $0,322 \cdot 10^6 \text{ ч}^{-1}$ .

Результаты расчетов для системы с увеличенной надежностью элементов 12, 13, 14 и 15 приведены в табл. II. В частности, там приведены расчетные значения вероятности  $P_{F_{над}}$  безотказной работы элемента  $F$  и

системы в целом  $P_{S_{\text{над}}}$ , полученные в результате повышения надежности элементов 12...15. При  $t=2,85 \cdot 10^6$  ч вероятность безотказной работы системы  $P_{S_{\text{над}}}(T_{\gamma \text{ треб}})=0,5011$ , что соответствует условиям задания. График  $P_{S_{\text{над}}}(t)$  приведен на рис. V.

Для второго способа увеличения вероятности безотказной работы системы – структурного резервирования – по тем же соображениям также выбираем элемент  $F$ , вероятность безотказной работы которого после резервирования должна быть не ниже 0,5226 (см. формулу (11)).

Для элемента  $F$  структурное резервирование означает увеличение общего числа элементов. Аналитически определить минимально необходимое количество элементов невозможно, т.к. число элементов должно быть целым и функция  $P_F=f(n)$  дискретна.

Для повышения надежности системы “2 из 4” добавляем к ней элементы, идентичные по надежности исходным элементам 12...15, до тех пор, пока вероятность безотказной работы элемента  $F$  не достигнет заданного значения.

Добавляем элемент 16, получаем квазиэлемент  $F_{\text{рез}}$ , представляющий собой систему типа “2 из 5”:

$$Q_{F_{\text{рез}}} = \sum_{k=0}^1 C_5^k P_{12}^k (1 - P_{12})^{5-k} = C_5^0 (1 - P_{12})^5 + C_5^1 P_{12} (1 - P_{12})^4 =$$

$$= (1 - P_{12})^5 + 5 P_{12} (1 - P_{12})^4 = 0,6528, \quad (13)$$

$$P_{F_{\text{рез}}} = 1 - Q_{F_{\text{рез}}} = 1 - 0,6528 = 0,3472; \quad (14)$$

– так как  $P_{F_{\text{рез}}} < 0,5226$ , добавляем элемент 17, получаем квазиэлемент  $F_{\text{рез}}$ , представляющий собой систему типа “2 из 6”:

$$Q_{F_{\text{рез}}} = \sum_{k=0}^1 C_6^k P_{12}^k (1 - P_{12})^{6-k} = C_6^0 (1 - P_{12})^6 + C_6^1 P_{12} (1 - P_{12})^5 =$$

$$= (1 - P_{12})^6 + 6 P_{12} (1 - P_{12})^5 = 0,5566, \quad (15)$$

$$P_{F_{\text{рез}}} = 1 - Q_{F_{\text{рез}}} = 1 - 0,5566 = 0,4434; \quad (16)$$

– так как  $P_{F_{\text{рез}}} < 0,5226$ , добавляем элемент 18, получаем квазиэлемент  $F_{\text{рез}}$ , представляющий собой систему типа “2 из 7”:

$$Q_{F_{\text{рез}}} = \sum_{k=0}^1 C_7^k P_{12}^k (1 - P_{12})^{7-k} = C_7^0 (1 - P_{12})^7 + C_7^1 P_{12} (1 - P_{12})^6 =$$

$$= (1 - P_{12})^7 + 7 P_{12} (1 - P_{12})^6 = 0,4689; \quad (17)$$

$$P_{F_{\text{рез}}} = 1 - Q_{F_{\text{рез}}} = 1 - 0,4689 = 0,5311. \quad (18)$$

Так как  $P_{F_{\text{рез}}} > 0,5226$ , полученная система (рис. VII) удовлетворяет требованиям задания (при  $t=T_{\gamma \text{ треб}}$   $P_{S_{\text{рез}}} > 0,5$ , что соответствует условию задания).

Результаты расчетов вероятностей безотказной работы системы типа “2 из 7”  $P_{F_{\text{рез}}}$  и системы в целом  $P_{S_{\text{рез}}}$  представлены в табл. II.

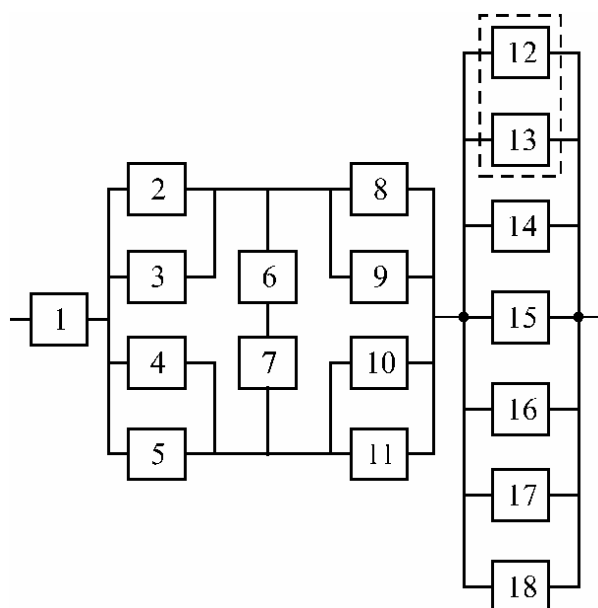


Рис. VII. Структурная схема системы после структурного резервирования

На рис. V показаны кривые зависимостей вероятности безотказной работы системы после повышения надежности элементов 12...15 (кривая  $P_{S_{над}}$ ) и после структурного резервирования (кривая  $P_{S_{рез}}$ ).

**Выводы:**

1. На рис. V представлена зависимость вероятности безотказной работы системы (кривая  $P_S$ ). Из графика видно, что 50-процентная наработка исходной системы составляет  $1,9 \cdot 10^6$  часов.

2. Для повышения надежности и увеличения 50-процентной наработки системы в 1,5 раза (до  $2,85 \cdot 10^6$  часов) предложено два метода:

а) повышение надежности элементов 12, 13, 14 и 15 путем уменьшения интенсивности их отказов с  $0,5 \cdot 10^6$  до  $0,322 \cdot 10^6$  ч<sup>-1</sup>;

б) нагруженное резервирование основных элементов 12 и 13 идентичными по надежности резервными элементами 14, 15, 16, 17 и 18 (см. рис. VII).

По вероятности безотказной работы модернизированной системы второй метод предпочтителен, так как кривая  $P_{S_{рез}}$  (см. рис. V) располагается выше кривой  $P_{S_{над}}$ .

Контрольная работа «Проектирование технической системы по заданным показателям надёжности и риска»

Исходные данные

Структурная схема надёжности системы представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема надёжности исходной системы

Число элементов в системе  $n = 4$ .

Расчётный период  $t_{расч} = 1$  год.

Коэффициент уменьшения риска системы  $m = 100$ .

Число бригад, восстанавливающих систему, равно числу элементов системы. Данные о наработке до отказа  $T_0$  каждого элемента, о времени восстановления  $T_B$  каждого элемента, о размерах потерь  $r_i$  при возникновении отказа  $i$ -го элемента приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Исходные данные

Характеристики элементов	Номера элементов $i$			
	1	2	3	4
$T_{0i}$ , лет	3	15	6	10
$T_{Bi}$ , час	1	240	2	48
$r_i$ , усл.ед.	10	$10^5$	40	$10^3$

Определить:

- вероятность безотказной работы исходной системы в течение расчётного периода  $P(t_{расч})$ ;
- среднюю наработку исходной системы до отказа  $T_0$ ;
- суммарный риск отказа исходной системы  $R(t_{расч})$ .

Разработать структурную схему надёжности системы, риск которой в  $m$  раз меньше риска исходной.

1. Определение показателей надёжности исходной системы и суммарного риска ее отказа

Находим интенсивности отказов элементов:

$$\lambda_i = \frac{1}{T_{0i}}$$

$$\lambda_1 = 1/3 = 0,3333 \text{ лет}^{-1}; \lambda_2 = 1/15 = 0,0667 \text{ лет}^{-1}; \lambda_3 = 1/6 = 0,1667 \text{ лет}^{-1}; \lambda_4 = 1/10 = 0,1 \text{ лет}^{-1};$$

Вероятности безотказной работы элементов равны:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}; P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}; P_3(t) = e^{-\lambda_3 t}; P_4(t) = e^{-\lambda_4 t};$$

$$P_1(t_{расч})=0,72; P_2(t_{расч})=0,93; P_3(t_{расч})=0,85; P_4(t_{расч})=0,90.$$

Находим вероятность безотказной работы системы  $P(t_{расч})$  и среднюю наработку до отказа  $T_0$

$$P(t_{расч}) = P_1(t_{расч}) \cdot P_2(t_{расч}) \cdot P_3(t_{расч}) \cdot P_4(t_{расч}) = 0,5134,$$

$$\lambda_{сист} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 0,6667,$$

$$T_0 = 1 / \lambda_{сист} = 1 / 0,6667 = 1,5 \text{ года.}$$

Риск отказа системы из-за  $i$ -го элемента равен:

$$R_{сист i}(t_{расч}) = r_i Q_i(t_{расч}) \prod_{j=1, j \neq i}^4 P_j(t_{расч}) = r_i (1 - P_i(t_{расч})) \prod_{j=1, j \neq i}^4 P_j(t_{расч}),$$

где  $Q_i$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента.

$$R_{сист 1}(t_{расч}) = r_1 (1 - P_1(t_{расч})) \cdot P_2(t_{расч}) \cdot P_3(t_{расч}) \cdot P_4(t_{расч}) = 10 \cdot (1 - 0,72) \cdot 0,93 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 2,0;$$

$$R_{сист 2}(t_{расч}) = r_2 (1 - P_2(t_{расч})) \cdot P_1(t_{расч}) \cdot P_3(t_{расч}) \cdot P_4(t_{расч}) = 6385,6;$$

$$R_{сист 3}(t_{расч}) = r_3 (1 - P_3(t_{расч})) \cdot P_1(t_{расч}) \cdot P_2(t_{расч}) \cdot P_4(t_{расч}) = 3,6;$$

$$R_{сист 4}(t_{расч}) = r_4 (1 - P_4(t_{расч})) \cdot P_1(t_{расч}) \cdot P_2(t_{расч}) \cdot P_3(t_{расч}) = 56,9.$$

Суммарный риск отказа системы определяется по формуле

$$R_{сист}(t_{расч}) = \sum_{i=1}^4 R_{сист i}(t_{расч}) = 6448,1.$$

Отсюда требуемый суммарный риск отказа системы равен:

$$R_{сист.гр} = R_{сист} / m = 6448,1 / 100 = 64,5.$$

## 2. Разработка структурной схемы надёжности системы, риск отказа которой в $m$ раз меньше риска отказа исходной

Риск отказа системы из-за второго элемента имеет наибольшее значение. Поэтому используем именно для данного элемента нагруженное резервирование. Структурная схема надежности получится следующей.

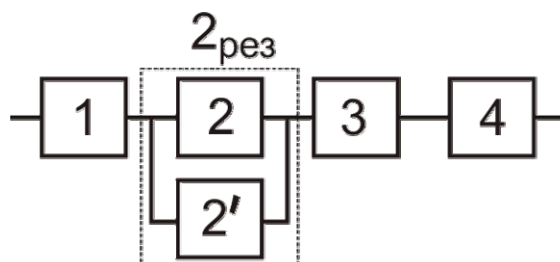


Рис. II. Структурная схема надёжности системы при нагруженном резервировании 2-го элемента



Определяем вероятность безотказной работы квазиэлемента  $2_{рез}$ :

$$P_{2рез}(t_{расч})=1-(1-P_2(t_{расч}))^2=0,995.$$

Находим поочередно риски отказа системы из-за каждого элемента:

$$R_{сист1}(t_{расч})=r_1(1-P_1(t_{расч}))\cdot P_{2рез}(t_{расч})\cdot P_3(t_{расч})\cdot P_4(t_{расч})=$$

$$=10\cdot(1-0,72)\cdot 0,995\cdot 0,85\cdot 0,9=2,1;$$

$$R_{сист2рез}(t_{расч})=r_2(1-P_{2рез}(t_{расч}))\cdot P_1(t_{расч})\cdot P_3(t_{расч})\cdot P_4(t_{расч})=275,4;$$

$$R_{сист3}(t_{расч})=r_3(1-P_3(t_{расч}))\cdot P_1(t_{расч})\cdot P_{2рез}(t_{расч})\cdot P_4(t_{расч})=3,9;$$

$$R_{сист4}(t_{расч})=r_4(1-P_4(t_{расч}))\cdot P_1(t_{расч})\cdot P_{2рез}(t_{расч})\cdot P_3(t_{расч})=60,9.$$

Суммарный риск отказа системы:

$$R_{сист.рез}(t_{расч})=R_{сист1}+R_{сист2рез}+R_{сист3}+R_{сист4}=342,3.$$

Видим, что суммарный риск отказа системы уменьшился менее чем в 100 раз, т.е. он еще не достиг требуемого уровня 65,53. Так как риск отказа системы из-за элемента  $2_{рез}$  больше остальных, добавляем к нему ещё один резервный элемент.

Находим риск отказа квазиэлемента  $2_{рез}$  при двух резервных элементах:

$$P_{сист2рез}(t_{расч})=1-(1-P_2(t_{расч}))^3=0,9997.$$

Находим риски отказа системы из-за каждого элемента:

$$R_{сист1}(t_{расч})=r_1(1-P_1(t_{расч}))\cdot P_{2рез}(t_{расч})\cdot P_3(t_{расч})\cdot P_4(t_{расч})=$$

$$=10\cdot(1-0,72)\cdot 0,9997\cdot 0,85\cdot 0,9=2,1;$$

$$R_{сист2рез}(t_{расч})=r_2(1-P_{2рез}(t_{расч}))\cdot P_1(t_{расч})\cdot P_3(t_{расч})\cdot P_4(t_{расч})=18,9;$$

$$R_{сист3}(t_{расч})=r_3(1-P_3(t_{расч}))\cdot P_1(t_{расч})\cdot P_{2рез}(t_{расч})\cdot P_4(t_{расч})=3,9;$$

$$R_{сист4}(t_{расч})=r_4(1-P_4(t_{расч}))\cdot P_1(t_{расч})\cdot P_{2рез}(t_{расч})\cdot P_3(t_{расч})=61,2.$$

Суммарный риск отказа системы:

$$R_{сист.рез}(t_{расч})=R_{сист1}+R_{сист2рез}+R_{сист3}+R_{сист4}=86,1.$$

Риск отказа системы снова не достиг требуемого значения. Зарезервируем теперь одним резервным элементом четвертый элемент, отказ которого вызывает наибольшую опасность по сравнению с другими элементами системы. В этом случае:

$$P_{4рез}(t_{расч})=1-(1-P_4(t_{расч}))^2=0,99.$$

Находим риски отказа системы из-за каждого элемента:

$$R_{сист1}(t_{расч})=r_1(1-P_1(t_{расч}))\cdot P_{2рез}(t_{расч})\cdot P_3(t_{расч})\cdot P_{4рез}(t_{расч})=$$

$$=10\cdot(1-0,72)\cdot 0,9997\cdot 0,85\cdot 0,9=2,3;$$

$$R_{сист2рез}(t_{расч})=r_2(1-P_{2рез}(t_{расч}))\cdot P_1(t_{расч})\cdot P_3(t_{расч})\cdot P_{4рез}(t_{расч})=20,8;$$

$$R_{сист3}(t_{расч})=r_3(1-P_3(t_{расч}))\cdot P_1(t_{расч})\cdot P_{2рез}(t_{расч})\cdot P_{4рез}(t_{расч})=4,3;$$

$$R_{сист4рез}(t_{расч})=r_4(1-P_{4рез}(t_{расч}))\cdot P_1(t_{расч})\cdot P_{2рез}(t_{расч})\cdot P_3(t_{расч})=6,1.$$

Суммарный риск отказа системы:

$$R_{сист.рез}(t_{расч})=R_{сист1}+R_{сист2рез}+R_{сист3}+R_{сист4рез}=33,5.$$

Таким образом, риск отказа системы достиг требуемого значения. При этом, структурная схема системы имеет вид, представленный на рис. III.

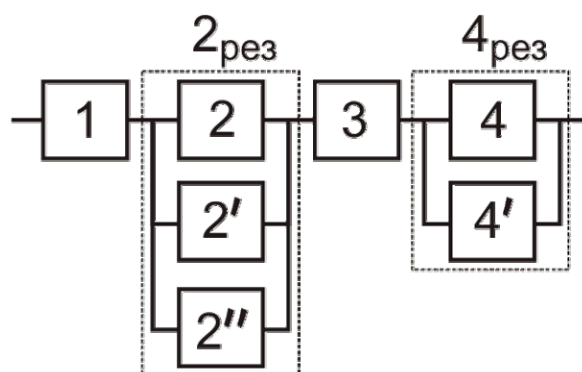


Рис. III. Оптимальная структурная схема надежности системы

### 3. Расчет показателей надежности усовершенствованной системы

#### 3.1. Расчет показателей надежности усовершенствованной системы при нагруженном резервировании

Произведем расчет показателей надежности спроектированной системы. Вероятность безотказной работы можно найти по формуле

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_{2рез}(t) \cdot P_3(t) \cdot P_{4рез}(t).$$

Значения функции  $P(t)$  при  $t=0; 0,1; \dots; 1$  приведены в табл. II. График вероятности безотказной работы изображен на рис. IV.

Т а б л и ц а II

Значения функции  $P(t)$

$t$ , лет	$P(t)$
0	1,000
0,1	0,875
0,2	0,766
0,3	0,670
0,4	0,587
0,5	0,513
0,6	0,449
0,7	0,393
0,8	0,344
0,9	0,301
1	0,264

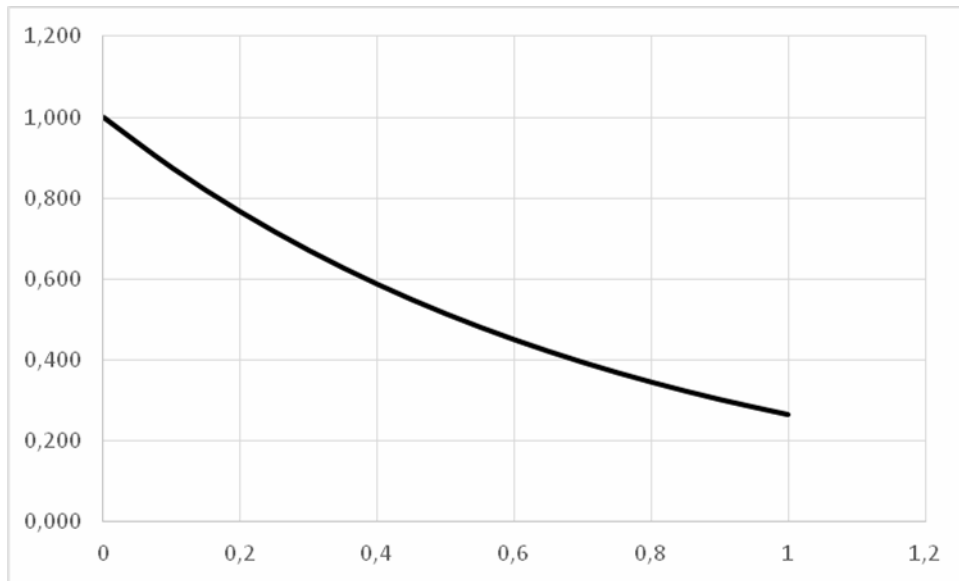


Рис. IV. Вероятность безотказной работы усовершенствованной системы при нагруженном резервировании

### 3.2. Расчет показателей надежности системы при резервировании замещением

Вероятности безотказной работы элементов и квазиэлементов вычисляются по формулам

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t};$$

$$P_{2_{рез}}(t) = \sum_{k=0}^z \frac{\lambda_2^k t^k}{k!} e^{-\lambda_2 t} = (1 + \lambda_2 t + \frac{\lambda_2^2 t^2}{2}) e^{-\lambda_2 t};$$

$$P_3(t) = e^{-\lambda_3 t};$$

$$P_{4_{рез}}(t) = \sum_{k=0}^z \frac{\lambda_4^k t^k}{k!} e^{-\lambda_4 t} = (1 + \lambda_4 t) e^{-\lambda_4 t},$$

где  $z$  – число резервных элементов.

$$P_1(t_{расч})=0,72; P_{2_{рез}}(t_{расч})=0,99995; P_3(t_{расч})=0,85; P_4(t_{расч})=0,9876.$$

Находим риски отказа системы из-за каждого элемента

$$R_{сист1}(t_{расч}) = r_1(1 - P_1(t_{расч})) \cdot P_{2_{рез}}(t_{расч}) \cdot P_3(t_{расч}) \cdot P_{4_{рез}}(t_{расч}) = 10 \cdot (1 - 0,72) \cdot 0,99995 \cdot 0,85 \cdot 0,9876 = 2,35;$$

$$R_{сист2_{рез}}(t_{расч}) = r_2(1 - P_{2_{рез}}(t_{расч})) \cdot P_1(t_{расч}) \cdot P_3(t_{расч}) \cdot P_{4_{рез}}(t_{расч}) = 3,02;$$

$$R_{сист3}(t_{расч}) = r_3(1 - P_3(t_{расч})) \cdot P_1(t_{расч}) \cdot P_{2_{рез}}(t_{расч}) \cdot P_{4_{рез}}(t_{расч}) = 4,27;$$

$$R_{сист4_{рез}}(t_{расч}) = r_4(1 - P_{4_{рез}}(t_{расч})) \cdot P_1(t_{расч}) \cdot P_{2_{рез}}(t_{расч}) \cdot P_3(t_{расч}) = 7,59$$

Суммарный риск отказа системы:

$$R_{сист.рез}(t_{расч}) = R_{сист1} + R_{сист2_{рез}} + R_{сист3} + R_{сист4_{рез}} = 17,23.$$

4. Разработка графа состояний восстанавливаемой системы

Граф состояний разработан для усовершенствованной системы, представленной на рис. V, при условии, что отказавшие элементы могут восстанавливаться. Данный граф изображен на рис. VI. Он имеет 21 узел, каждый из которых обозначен соответствующим числом в диапазоне от 0 до 20. Направление стрелок сверху вниз соответствует отказовым переходам, а снизу вверх – восстановлению элементов. На графе кружками отмечены работоспособные состояния системы, а квадратами – отказовые. Внутри графического обозначения состояний указываются отказавшие элементы в соответствующей последовательности.

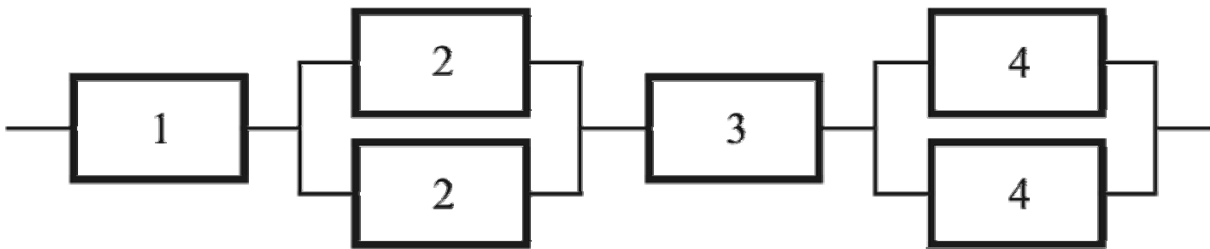


Рис. V. Структурная блок-схема надежности восстанавливаемой системы

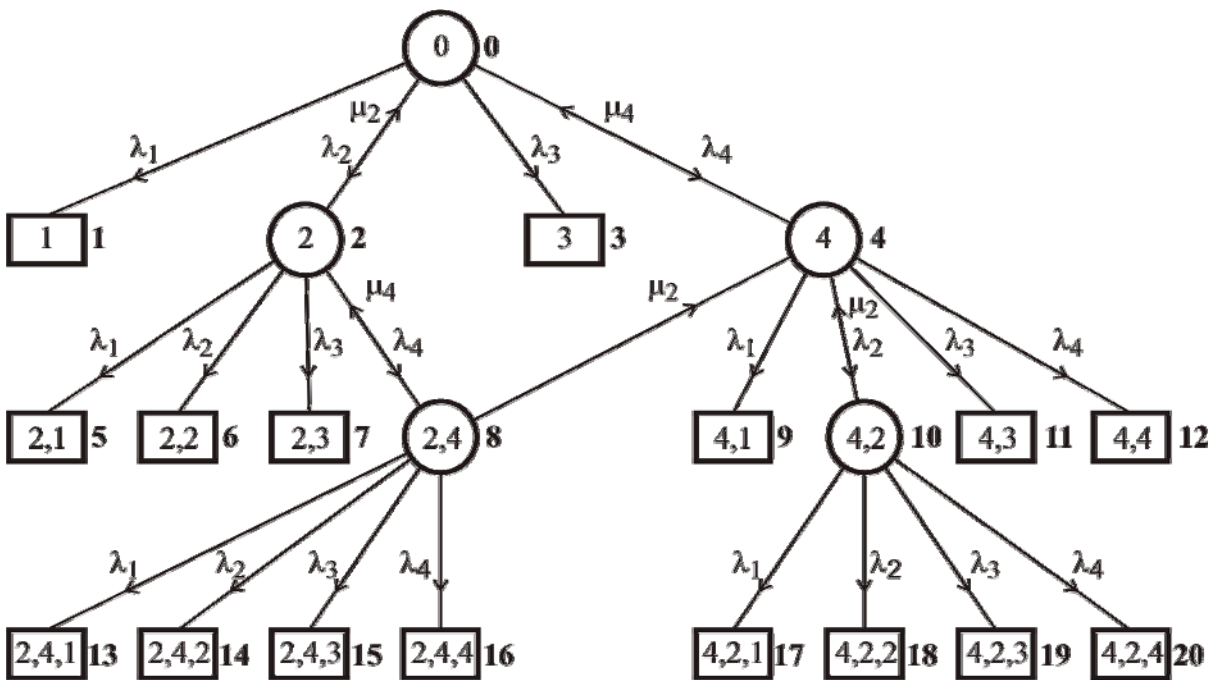


Рис. VI. Граф состояний восстанавливаемой системы

Интенсивности отказового перехода из каждого узла равны соответственно  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ . Интенсивности ремонта для второй и четвертой подсистем равны соответственно  $\mu_2, \mu_4$ .

Для удобства записи системы уравнений пронумеруем узлы графа в естественном порядке. Тогда узлы (0), (2), (4), (8), (10) соответствуют

исправным, а остальные узлы – отказовым состояниям. По графу составляется система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая в данном случае имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} p'_0(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)p_0(t) + \mu_2 p_2(t) + \mu_4 p_4(t) \\ p'_1(t) = \lambda_1 p_0(t) \\ p'_2(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_2)p_2(t) + \lambda_2 p_0(t) + \mu_4 p_8(t) \\ p'_3(t) = \lambda_3 p_0(t) \\ p'_4(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_4)p_2(t) + \lambda_4 p_0(t) + \mu_2(p_8(t) + p_{10}(t)) \\ p'_5(t) = \lambda_1 p_2(t) \\ p'_6(t) = \lambda_2 p_2(t) \\ p'_7(t) = \lambda_3 p_2(t) \\ p'_8(t) = \lambda_4 p_2(t) \\ p'_9(t) = \lambda_1 p_4(t) \\ p'_{10}(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \mu_2)p_{10}(t) + \lambda_2 p_4(t) \\ p'_{11}(t) = \lambda_3 p_4(t) \\ p'_{12}(t) = \lambda_4 p_4(t) \\ p'_{13}(t) = \lambda_1 p_8(t) \\ p'_{14}(t) = \lambda_2 p_8(t) \\ p'_{15}(t) = \lambda_3 p_8(t) \\ p'_{16}(t) = \lambda_4 p_8(t) \\ p'_{17}(t) = \lambda_1 p_{10}(t) \\ p'_{18}(t) = \lambda_2 p_{10}(t) \\ p'_{19}(t) = \lambda_3 p_{10}(t) \\ p'_{20}(t) = \lambda_4 p_{10}(t) \end{array} \right.$$

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ .....	5
1.1. Основные термины, понятия и определения теории надежности ...	5
1.2. Случайные величины, их свойства и характеристики .....	22
1.3. Вероятностные законы распределения, используемые в расчетах надежности .....	26
1.4. Показатели надежности .....	34
1.5. Способы описания надежности технических систем .....	42
1.6. Модели отказов изделий .....	58
1.7. Надежность автомобиля .....	82
Контрольные вопросы .....	85
2. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ .....	89
2.1. Порядок расчета надежности .....	89
2.2. Общая схема расчета .....	90
2.3. Идентификация объекта .....	90
2.4. Методы расчета надежности .....	91
2.5. Расчет надежности систем .....	108
Контрольные вопросы .....	116
3. ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ .....	118
3.1. Научное планирование эксперимента .....	123
3.2. Испытания для контроля вероятности безотказной работы .....	125
3.3. Испытания для контроля коэффициента готовности .....	138
3.4. Способы сокращения объема испытаний .....	140
Контрольные вопросы .....	142
4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ .....	143
4.1. Методы прогнозирования надежности .....	143
4.2. Встроенное прогнозирование изменения технического состояния мобильной техники .....	144
Контрольные вопросы .....	150
5. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ .....	151
5.1. Термины и определения системы управления надежностью .....	151
5.2. Программа обеспечения надежности .....	158
5.3. Задание технических требований к надежности .....	163
5.4. Управление надежностью .....	171
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	201
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	202

ПРИЛОЖЕНИЯ.....	206
Приложение 1. Примеры решения контрольных задач.....	206
Приложение 2. Контрольная работа «Расчет надежности системы»...	217
Приложение 3. Контрольная работа «Проектирование технической системы по заданным показателям надёжности и риска» .....	231

Учебное издание

Ширшиков Андрей Станиславович  
Лянденбургский Владимир Владимирович  
Белоковылский Александр Михайлович

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
Учебное пособие

Редактор М.А. Сухова  
Верстка Н.А. Сазонова

---

Подписано в печать 11.04.12. Формат 60×84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 15,0. Тираж 300 экз. 1-й завод 100 экз.  
Заказ № 213.

---

Издательство ПГУАС.  
440028, г.Пенза, ул. Г. Титова, 28.

