

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**Донецкий национальный технический университет  
ДонНТУ  
Кафедра охраны труда и аэрология**

**Надёжность технических систем и техногенный риск**

Конспект лекций

Для студентов технических специальностей  
дневной и заочной форм обучения

**РАССМОТРЕНО**  
на Заседании кафедры  
охраны труда и аэрологии  
протокол № 10 от 19.05.2016 г.

**Донецк 2016**

УДК 681.518

Лекции по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск» предназначены для студентов технических специальностей дневной и заочной форм обучения Донецкого национального технического университета (ДонНТУ). Лекции составлены в соответствии с требованиями учебного плана кафедры «Охраны труда и аэрологии» университета. При составлении лекций использованы литературные источники, законодательная нормативно-техническая документация по профилю знаний.

Составитель: к.т.н., доц. В.Л. Овчаренко – Донецк, ДонНТУ, 2015г. – 121 с.

Рецензент: проф. д.т.н. Ю.Ф. Булгаков

## Содержание

<b>Лекция 1.</b> Техническая система и её элементы_____	4
<b>Лекция 2.</b> Качественные показатели надёжности и эффективности систем_____	11
<b>Лекция 3.</b> Законы распределения, используемые в теории Надёжности_____	17
<b>Лекция 4.</b> Основные понятия надёжности. Классификация отказов. Составляющие надёжности_____	25
<b>Лекция 5.</b> Теория вероятностей в математических расчетах надёжности технических систем_____	31
<b>Лекция 6.</b> Показатели надёжности невосстанавливаемых Объектов_____	39
<b>Лекция 7.</b> Показатели надёжности восстанавливаемых объектов_____	47
<b>Лекция 8.</b> Математические зависимости для оценки надёжности технических систем_____	51
<b>Лекция 9.</b> Надёжность технических систем_____	58
<b>Лекция 10.</b> Расчет показателей надёжности технических систем_____	62
<b>Лекция 11.</b> Оценка безопасности технических систем_____	71
<b>Лекция 12.</b> Логико-графические методы анализа надёжности и риска_____	78
<b>Лекция 13.</b> Основы теории и практики техногенного риска_____	89
<b>Лекция 14.</b> Качественные методы анализа риска_____	96
<b>Лекция 15.</b> Количественная оценка риска, приемлемый риск. Управление риском_____	101
<b>Лекция 16.</b> Правовые основы анализа риска и управления промышленной безопасностью_____	109
<b>Вопросы к экзаменационным билетам по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск»_____</b>	<b>119</b>

## Техническая система и её элементы

### 1.1. Понятие техносферы, техники и технической системы

**Техносфера** — часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком в технические и техногенные объекты (механизмы, здания, сооружения, горные выработки, дороги и т.д.) с помощью прямого или косвенного воздействия технических средств в целях наилучшего соответствия социально-экономическим потребностям человека. Таким образом, в преобразовании участвуют техника, технические системы и используемая технология [1].

**Техника** (от греч. *techne* - искусство, мастерство, умение) - совокупность средств человеческой деятельности, созданных для осуществления процессов производства и обслуживания непродовольственных потребностей общества. В технике материализованы знания и производственный опыт, накопленные человечеством в процессе развития производства. Техника облегчает трудовые усилия человека и увеличивает их эффективность, позволяет преобразовывать природу в соответствии с потребностями общества. По мере развития производства техника последовательно заменяет человека в выполнении технологических функций, связанных с физическим и умственным трудом. Средствами техники пользуются для воздействия на предметы труда при создании материальных и культурных благ, для получения, передачи и превращения энергии, исследования законов развития природы и общества, передвижения и связи, сбора, хранения, переработки и передачи информации, управления обществом, обслуживания быта, ведения войны и обеспечения обороны.

По функциональному назначению различают технику производственную, военную, бытовую, медицинскую, для научных исследований, образования, культуры и др.

Основную часть технических средств составляет производственная техника, к которой относятся машины и механизмы, инструменты, аппаратура управления машинами и технологическими процессами, а также производственные здания и сооружения, коммуникации и т. д.

Технику обычно классифицируют по отраслевой структуре производства (например, промышленности, транспорта) или применительно к отдельным структурным подразделениям производства. Например, техника авиационная, мелиоративная, энергетическая, химическая, горная и т.п.

Техника все в большей мере становится материализацией научных знаний. Развитие техники выражается в создании новых и усовершенствовании существующих типов машин, оборудования, повышения технического уровня производств, процессов, их комплексной механизации и автоматизации, в создании новых материалов, топлива и преобразователей энергии и т.п.

**Техника прошла путь развития от примитивных машин до сложнейших автоматических машин, объединенных в единое целое - систему, имеющую структуру, направленную на достижение определенных целей [1].**

**Технической системой** называют упорядоченную совокупность элементов, которые находятся в определенных связях друг с другом и образуют целостность, единство.

Современная цивилизация столкнулась с грандиозной проблемой, заключающейся в том, что основа бытия общества – промышленность, сконцентрировав в себе колоссальные запасы энергии и новых материалов, стала угрожать жизни и здоровью людей, и даже окружающей среде [1].

Авария в условиях современной техносферы по своим масштабам и тяжести последствий стала сравнима с природными катастрофами и разрушительными последствиями военных действий с применением ядерного оружия. Как свидетельствуют статистические данные последние 20 лет 20-го века принесли 56% от наиболее крупных происшествий в промышленности и на транспорте. Считается, что ущерб от аварийности и травматизма достигает 10...15% от валового национального продукта промышленно развитых государств, а экологическое загрязнение окружающей природной среды и несовершенная техника безопасности являются причиной преждевременной смерти 20...30% мужчин и 10...20% женщин. В 1995 году на территории РФ было зафиксировано около 1550 чрезвычайных ситуаций, из которых 1150 носили техногенный характер и 400 – природный. В них пострадало 18000 человек, погибло свыше 1800.

Сложившаяся кризисная ситуация в вопросах аварийности и травматизма объясняется не только низкой культурой безопасности и технологической недисциплинированностью персонала, но и конструктивным несовершенством используемого промышленного и транспортного оборудования.

В наибольшей степени аварийность свойственна угольной, горнорудной, химической, нефтегазовой и металлургической отраслям промышленности, транспорту. Проблема предупреждения происшествий приобретает особую актуальность в атомной энергетике, химической промышленности, при

эксплуатации военной техники, где используется и обращается мощные источники энергии, высокотоксичные и агрессивные вещества.

Основными причинами крупных техногенных аварий являются:

- отказы технических систем из-за дефектов изготовления и нарушений режимов эксплуатации;
- ошибочные действия операторов технических систем;
- концентрации различных производств в промышленных зонах;
- высокий энергетический уровень технических систем;
- внешние негативные воздействия на объекты энергетики, транспорта и др.

**Оценка и обеспечение надежности и безопасности технических систем - одна из важнейших проблем в современной технике и экономике.**

**Понятие опасности.**

*Опасность — следствие действия некоторых негативных (вредных и опасных) факторов на определенный объект (предмет) воздействия. При несоответствии характеристик воздействующих факторов характеристикам объекта (предмета) воздействия и появляется феномен опасности.*

Оценка опасности различных производственных объектов заключается в определении возникновения возможных чрезвычайных ситуаций, разрушительных воздействий пожаров и взрывов на эти объекты, а также воздействия опасных факторов пожаров и взрывов на людей. Оценка этих опасных воздействий на стадии проектирования объектов осуществляется на основе теории надежности и нормативных требований, разработанных с учетом наиболее опасных условий протекания чрезвычайных ситуаций и проявления их негативных факторов, утечек и проливов опасных химических веществ, пожаров и взрывов, т.е. с учетом аварийной ситуации.

**Процесс развития опасности:**

- *нарушение технологического процесса, допустимых пределов эксплуатации, условий содержания и т. п.;*
- *накопление, образование поражающих факторов, приводящих к аварии технические системы;*
- *разрушение конструкции;*
- *выброс, образование поражающих факторов;*
- *воздействие (взаимодействие) поражающих факторов с объектом воздействия (с окружающей природной средой, человеком, объектами техносферы и пр.);*
- *реакция на поражающее воздействие.*

Каждому такому событию можно приписать частный показатель в виде вероятности события:

- *вероятность отказа технической системы;*
- *вероятность аварийного исхода;*
- *вероятность образования поражающих факторов;*
- *вероятность поражения объектов воздействия;*
- *вероятность вторичных поражающих факторов;*
- *вероятность воздействия;*
- *вероятность поражения.*

**Пороговый уровень опасности** – уровень опасности при котором организм человека способен компенсировать их негативное воздействие. Он заложен в ряд предельно допустимых значений — ПДУ (предельно допустимый уровень), ПДК (предельно допустимая концентрация) и др.

Пороговый уровень воздействия опасности существует и для технических систем, строительных конструкций, горнотехнических сооружений и т. д. Он характеризуется способностью элементов технических систем, строительных конструкций и т.д. сопротивляться до определенного предела и в течение определенного времени негативным (разрушающим) воздействиям или полезным (рабочим) нагрузкам, сохраняя при этом свои заданные функции. Этот уровень оценивается качественными и количественными характеристиками материала элементов или систем в целом, именуемыми показателями надежности.

#### **Аксиомы потенциальной опасности технических систем**

**Аксиома 1.** *Любая техническая система потенциально опасна.*

**Аксиома 2.** *Техногенные опасности существуют, если повседневные потоки вещества, энергии и информации в техносфере превышают пороговые значения.*

**Аксиома 3.** *Источниками техногенных опасностей являются элементы техносферы. (выбросы в атмосферу, стоки в гидросферу, поступление твердых веществ на земную поверхность, энергетические излучения и поля) сопровождается формированием вредных воздействий на человека, природную среду и элементы техносферы.*

**Аксиома 4.** *Техногенные опасности действуют в пространстве и во времени.*

**Аксиома 5.** *Техногенные опасности оказывают негативное воздействие на человека, природную среду и элементы техносферы одновременно.*

**Аксиома 6.** *Техногенные опасности ухудшают здоровье людей, приводят к травмам, материальным потерям и к деградации природной среды.*

## 1.2. Элементы технических систем

**Элементом технической системы** является простейшая составная часть изделия, в задачах надёжности может состоять из многих деталей.

Например: улевыемочный комбайн, при установлении его собственной надёжности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов – механизмов, деталей и т. п., а при, а при изучении надёжности технической линии – как элемент.

Под упорядоченной совокупностью отдельных элементов понимают, множество элементов связанных между собой функционально и взаимодействующих таким образом, чтобы обеспечить выполнение некоторых заданных функций (достижение цели) при различных состояниях работоспособности [2].

**Объект** – техническое изделие определённого целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации. Объектами могут быть различные системы и их элементы, в частности: сооружения, установки, технические изделия, устройства, машины, аппараты, приборы и их части, агрегаты и отдельные детали.

Упорядоченность означает, что относительно окружающей среды система выступает и соответственно воспринимается как нечто функционально единое.

**Признаком системы является** структурированность, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели (рис.1.1).

Обязательным компонентом любой системы являются составляющие элементы (подсистемы) и само понятие элемента условно и относительно, так как любой элемент, в свою очередь, всегда можно рассматривать как совокупность других элементов.

Поскольку все подсистемы и элементы, из которых состоит система, определенным образом размещены и взаимосвязаны, образуя данную систему, можно говорить о структуре системы.

**Структура системы** - это то, что остается неизменным в системе при изменении ее состояния, при реализации различных форм поведения, при совершении системой операций и т.п.

Любая система имеет, как правило, иерархическую структуру, т.е. может быть представлена в виде совокупности подсистем разного уровня, расположенных в порядке постепенности. При анализе тех или иных конкретных систем достаточным оказывается выделение некоторого определенного числа ступеней иерархии.



Системы функционируют в пространстве и времени. Процесс функционирования систем представляет собой изменение состояния системы, переход ее из одного состояния в другое. В соответствии с этим системы подразделяются на статические и динамические [2, 3]. **Статическая система** - это система с одним возможным состоянием. **Динамическая система** - система с множеством состояний, в которой с течением времени происходит переход от состояния в состояние.

Система может быть расчленена на иерархически связанные элементы, вступающие друг с другом во взаимодействие и выполняющие определенные функции при достижении системой заданных целей. В зависимости от степени влияния на функциональные характеристики системы ее элементы образуют первый, второй, третий и т. д. иерархические уровни.

В понятии *связи* между элементами технической системы отражено возникновение и сохранение структуры и свойств системы, а также особенностей её функционирования.

Под *состоянием* технической системы понимают совокупность важных свойств, которыми система обладает в определенный момент времени.

Если техническая система способна переходить из одного состояния в другое, то говорят, что она обладает *поведением*.

Под *внешней средой* понимают множество элементов, которые не входят в техническую систему, но изменение состояния которых влияет на ее поведение.

Понятие технической системы может применяться к отдельным узлам и механизмам (гироскоп, двигатель, система подачи топлива к двигателю), к машинам (станок, трактор, самолет, ракета), к системам машин (производственный участок, цех, машиностроительный завод, ремонтные станции машин).

Техническая система в целом и ее отдельные элементы характеризуются набором параметров, отражающих их состояние [4, 5].

Параметры, от которых зависит выполнение технической системой функций в соответствии с ее служебным назначением, а также взаимодействие (соединение) системы с элементами внешней среды, называются *выходными параметрами*. Параметры элементов системы, образующие более низкий иерархический уровень и влияющие на выходные параметры называются *входными параметрами*.

К показателям технических систем относятся:

- **надёжность** (безотказность, долговечность, ремонтпригодность);

- **эргономические показатели** - определяют систему взаимодействия «человек-машина» и характеризуют комплекс гигиенических, антропометрических, физиологических и психологических свойств, которые проявляются в процессах взаимодействия системы «человек-машина»;

- **гигиенические показатели** используются при определении взаимодействия человека с технической системой (показатели освещенности, температуры, влажности, магнитного и электрического полей, запыленности, излучения, токсичности, шума, вибрации, перегрузок и т. д.);

- **физиологические и психофизиологические показатели** используются при определении соответствия системы физиологическим свойствам человека и особенностям функционирования его органов чувств. Эти показатели характеризуют соответствие системы возможностям человека воспринимать и перерабатывать информацию, соответствие системы закрепленным и вновь приобретенным навыкам человека;

- **экологические показатели** определяют уровень вредных воздействий на окружающую среду при эксплуатации, производстве, потреблении и транспортировании продукции (содержание вредных компонентов, выбрасываемых в окружающую среду, вероятность выбросов вредных компонентов - газов, жидкостей, различных излучений и т. д.);

- **экономические показатели** характеризуют объем затрат на обеспечение допустимого уровня безопасности.

## **Литература**

1. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.

2. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.

3. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.

4. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.

5. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.

## Качественные показатели надёжности и эффективности систем

### 2.1. Общие положения

Системы, которые, обладая свойством активности стремятся к достижению некоторой цели называются эргатическими системами (ЭС) и относятся к классу целенаправленных систем [1].

О результативности этой активности, можно судить по конечному результату – степени достижения цели.

*Эргатический (от греч. ergates действующее лицо, деятель) процесс – любой производственный процесс, протекающий с участием человека.*

Необходимо различать свойства и показатели эффективности, качества и надёжности функционирования системы.

**Эффективность системы** — свойство достигать конечной цели, т.е. получать продукт труда с заданным качеством в заданных условиях и обусловленные достижением цели результаты или эффект от них.

**Качество функционирования системы** – совокупное свойство, определяемое характеристиками процесса функционирования, ведущего к достижению конечной цели в заданных условиях.

**Надёжность функционирования** – свойство сохранить устойчивость процесса функционирования, заключающуюся в отсутствии вынужденных прекращений процесса (срывов функционирования) и неправильных действий (ошибок).

Надёжность и качество функционирования – это процессуальные свойства, а эффективность – это результирующее свойство. Надёжность функционирования обуславливается двумя факторами: качеством функционирования (практически величиной разброса характеристик, описывающих качество функционирования) и внешними требованиями к качеству функционирования (практически величиной ограничений на предельно допустимые отклонения характеристик качества функционирования).

Эффективность обуславливается надёжностью функционирования (степенью бесперебойности процесса функционирования) и качеством процесса функционирования (уровнем характеристик процесса функционирования на интервалах бесперебойного функционирования).

В зависимости от задач исследования или применения могут использоваться различные градации эффективности :

- **прагматическая эффективность** – в качестве оценки принимается степень достижения поставленной перед системой цели (оценка по достигаемому результату);

- **специфическая (техническая, военная и т.д.) эффективность** – в качестве оценки принимается эффект, получаемый благодаря достижению цели системой (оценка по эффекту);

- **специфически-экономическая (техничко-экономическая, военно-экономическая и т.д.) эффективность** – при оценке учитывается не только достигаемый системой материальный эффект, но и материальные заслуги, которые необходимы для достижения этого эффекта (оценка по комплексу "эффект — затраты")

Надежность характеризует качество технического средства. Показатели надежности в технике входят в номенклатуру нормируемых показателей качества.

Предметом науки о надежности является изучение закономерностей изменения показателей качества объектов во времени и разработка методов, позволяющих с минимальной затратой времени и ресурсов обеспечить необходимую продолжительность и эффективность их работы.

Особенно большое значение имеет прогноз на ранних стадиях жизненного цикла объекта (разработка и изготовление), когда необходимо дать оценку эффективности принятых конструкторских решений и применяемых технологических методов для обеспечения требуемого уровня качества и эффективности применения объекта в предполагаемых условиях эксплуатации, в течение необходимого времени применения.

## **2.2. Понятие о качестве технической системы и его составляющих**

Разные образцы однотипной продукции, находящиеся в обращении на рынке, могут в разной степени соответствовать конкретному набору требований. А значит, их качество можно сравнивать. Таким образом, уровень качества конкретной продукции определяется степенью соответствия ее показателей качества конкретным требованиям, с одной стороны, и соотношением с аналогичными показателями других образцов однотипной продукции с другой [1, 2].

Логично утверждать, что теория надежности исследует показатели качества не с целью сравнения образцов продукции. Этот аспект оценки качества продукции относится к квалиметрии. Теория надежности исследует изменчивость показателей надежности, являющихся

одновременно показателями качества, в течение времени (по мере исчерпания ресурса или срока хранения).

Представляется, однако, что теория надежности и обеспечение качества хотя и сильно взаимосвязанные, но все же это различные научные дисциплины, имеющие свои специфические предметы исследований. Это особенно явно проявляется в соотношениях: «надежность-безопасность», «качество-безопасность».

В обеспечении качества безопасность не исследуется – это присущее свойство продукции, а в теории надежности показатели рассматриваются одновременно как потребительские свойства продукции и как параметры, влияющие на величину риска, определяемого вероятностью нанесения ущерба и его тяжестью при нарушении работоспособного состояния объекта.

Формулирование этого определения, приведенные в ГОСТ 15467—79 и в международном стандарте ИСО 8402—86 аналогичны по смыслу и по форме.

ГОСТ 15467—79 Качество продукции — совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением

ИСО 8402—86 Качество — совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные или предполагаемые потребности.

Государства выступают гарантами соблюдения этих стандартов.

Качество наукоемкой производственной продукции, являющейся одной из технических систем, можно обеспечить, лишь опираясь на созданную в обществе пирамиду формирования качества .

Мерой свойств объектов являются **показатели свойств**, позволяющие количественно сопоставлять одноименные свойства различной продукции одного назначения. Каждый показатель свойства является следствием сочетания множества параметров, влияющих на численное значение показателя свойства.

Свойства продукции можно разделить на следующие основные группы: потребительские; экономические; производственные; а также свойства, ограничивающие рынок сбыта продукции.

Из группы потребительских свойств технических систем выделяют свойства: **свойства точности и надежности функционирования.**

**Свойства точности функционирования** технической системы определяют степень соответствия фактических значений выходных параметров системы  $Y_j^{\Phi}$  номинальным –  $Y_j^H$  ( $j=1...m$  – порядковый номер

параметра). Эта степень соответствия характеризуется погрешностями выходных параметров  $VY_j$ :

$$VY_j = Y_j^\phi - Y_j^H,$$

Абсолютная погрешность  $VY_j$  состоит из случайной  $VY_{jсл}$  и систематической  $VY_{jс}$  составляющих:

$$VY_j = VY_{jсл} + VY_{jс}.$$

Первая составляющая принимает случайные значения по модулю и знаку, вторая либо постоянна, либо закономерно изменяется.

Количественной мерой точности измерения параметров системы является абсолютная погрешность измерения  $VX_n$ , которая определяется как разность между результатом измерения (ПИ)  $X_{пн}$  и действительным значением параметра  $X_{д}$ :

$$VX_n = X_{пн} - X_{д}.$$

Погрешности измерения могут быть представлены в безразмерной форме – см. уравнение (1.3).

Таким образом, погрешности выходных параметров  $VY_j$  есть сложные функции  $Q_j$  номинальных значений  $X_{ни}$  и погрешностей  $VX_j$  входных параметров

$$VY_j = Q_j(X_{ни}, VX_j).$$

В технической документации на погрешности параметров системы накладываются ограничения, обусловленные требованиями к ее функционированию в соответствии со служебным назначением, а также требованиями функциональной взаимозаменяемости и беспригоночной сборки (сборочная взаимозаменяемость). Эти ограничения на чертежах изделия, в технических требованиях и технических условиях представлены в виде допусков.

Ограничения, накладываемые на выходные параметры, не должны противоречить ограничениям на входные параметры, т. е. действительные значения выходных параметров не должны превышать допуски на них для любой комбинации погрешностей входных параметров, удовлетворяющих сформулированным ограничениям.

Одной из важных граней качества товара является надёжность.. Надёжность должна оцениваться объективными методами и выражаться количественными характеристиками, иначе её невозможно обосновать и доказать соответствие требуемому уровню.

В новой версии стандарта ISO 9001-2015 связь надёжности и качества еще более тесная, поскольку в этот стандарт по системам менеджмента качества включены требования к менеджменту риска.

Характеристики надежности отражаются в характеристиках потребительских свойств. К таким свойствам относится «гарантийный срок службы». Он сам по себе не является показателем надежности (см. ГОСТ 27.002, примечания к терминам) и устанавливается с оптимальным риском на основе исследований надежности объективными методами.

В отличие от гарантий такой показатель надежности (а именно, надежности в процессе эксплуатации) как «ремонтпригодность» одновременно выступает и в качестве потребительского свойства, так как потребителя всегда интересуют возможности продления работоспособного состояния приобретенной продукции с минимальными проблемами. Для него важно либо иметь возможность отремонтировать устройство (для чего должна быть налажена продажа запчастей), либо сдать ее в ремонт (для чего должна существовать сеть доступного сервиса).

**Безопасность** – важное свойство продукции. Если продукция может являться источником непосредственной опасности (в условиях нормальной работы или в результате повреждения, отказа или при достижении предельного состояния), то параметры безопасности продукции нормируются. В этом случае либо продукция удовлетворяет нормам безопасности, либо нет. Однако возможны ситуации, когда продукция может явиться источником опосредованной опасности (что никак не нормируется). Это зависит от области конкретного применения продукции.

Сам по себе отказ устройства может не представлять особой опасности, но при работе его в составе более сложной и более опасной системы, его отказ может явиться исходным событием, инициирующим серьезные последствия. Это учитывается при оценке безопасности в ядерно-опасных объектах. Это имеет место и в системах автоматизированного управления опасными объектами. В последнем случае для описания такой ситуации введено понятие **функциональной безопасности** (в основном, в отношении программных средств автоматизированных систем управления).

Эти вопросы важны для потребителя, так как он должен иметь представление о потенциальной опасности продукции в различных эксплуатационных условиях применения.

**Безопасность объекта технического регулирования** (далее – безопасность) - состояние уверенности в том, что отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда здоровью населения и среде обитания человека.

Недопустимый риск - уровень риска (*риск как мера опасности*), при котором превышены допустимые уровни воздействия и возникает реальная угроза здоровью человека и окружающей среде. Количественно риск может выражаться как вероятность реализации события на каком-то отрезке времени, приводящего к определенному уровню воздействия.

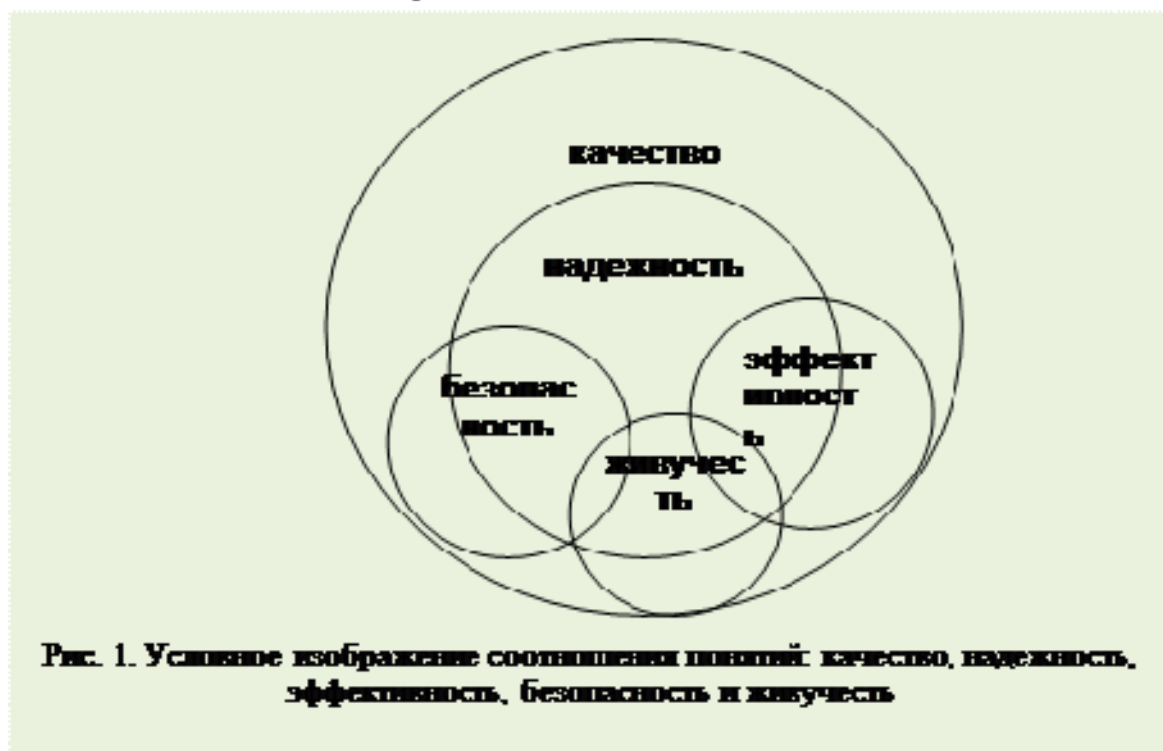
Живучесть (*fail-safe concept*) - понятие, связанное как с надежностью, так и с безопасностью:

– свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта;

- свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или при наличии дефектов и повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов.

Эффективность работы технического устройства оценивается активностью его использования для получения требуемого результата.

Соотношение обсуждаемых понятий изображено в виде взаимосвязанных областей на рис..1.



**Рис. 1. Усиленное изображение соотношения понятий: качество, надежность, эффективность, безопасность и живучесть**

Наиболее общим и многоплановым является понятие качества объекта.

Для анализа и обеспечения работоспособности объектов необходимо различать внутренние и внешние источники:

Внутренние источники нарушений: отказы технических средств объекта, ошибки в программах функционирования и эксплуатации,



нарушения координации протекающих в объекте процессов, ошибки управляющего и обслуживающего персонала.

**Внешние источники нарушений:** случайные и/или преднамеренные воздействия на объект, способные нарушить его работоспособность.

Наличие внутренних и внешних источников нарушений работоспособности является объективной реальностью эксплуатации объектов.

На практике качество изделия по отношению к внутренним источникам определяется:

- по отношению к внутренним источникам – надежностью (способностью объекта сохранять работоспособность);

- по отношению к внешним источникам – живучестью.

Последствия нарушений работоспособности объекта можно объединить в две группы:

- нарушения, приводящие к частичному или полному невыполнению предписанных функций, финансовым или материальным потерям;

- нарушения, создающие угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды.

В первом случае объект характеризуется свойством, определяемым как эффективность, во втором – как безопасность.

### Литература

1. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. М., 1982.

2. Методические рекомендации по оценке надежности и эффективности систем "человек - техника" / Под ред. А.И. Губинского. М., 1971.

## Лекция 3

### **Законы распределения, используемые в теории надёжности**

В теории надежности наибольшее распространение получили следующие законы распределения случайных величин  $f(t)$ :

· **для дискретных случайных величин:**

- закон Пуассона;

· **для непрерывных случайных величин:**

- экспоненциальный закон;

- нормальный закон;
- гамма-распределение и др.

### 3.1. Закон распределения Пуассона

Закон распределения Пуассона описывает закономерность появления случайных отказов в сложных системах. Этот закон нашёл широкое применение при определении вероятности появления и восстановления отказов.

Случайная величина  $X$  распределена по *закону Пуассона*, если вероятность того, что эта величина примет определённое значение  $m$ , выражается формулой

$$P_m = (\lambda^m / m!) e^{-\lambda} \quad (3.1)$$

где  $\lambda$  – параметр распределения (некоторая положительная величина);

$m = 0, 1, 2, 3, \dots, n$  математическое ожидание  $Mx$  и дисперсия  $Dx$  случайной величины  $X$  для закона Пуассона равны параметру распределения  $\lambda$ :

$$Mx = Dx = \lambda$$

Распределение Пуассона является однопараметрическим с параметром  $\lambda$ .

**Пример 3.1.** В ремонтную мастерскую по обслуживанию телевизоров поступают заявки со средней плотностью 5 шт. в течение рабочей смены за 10ч. Считая, что число заявок на любом отрезке времени распределено по закону Пуассона, найти вероятность того, что за 2 ч рабочей смены поступят две заявки.

Решение. Среднее число заявок за 2 ч равно  $\lambda = 2 * 5 / 10 = 1$ .

Применяя формулу (3.1), найдем вероятность поступления двух заявок

$$P_m = (\lambda^m / m!) e^{-\lambda} = (1^2 / 2!) * e^{-1} = 0,184.$$

### 3.2. Экспоненциальное распределение

Экспоненциальный закон распределения, называемый также основным законом надёжности, часто используют для прогнозирования надёжности в период нормальной эксплуатации изделий, когда *постепенные отказы* ещё не проявились и надёжность характеризуется *внезапными отказами*. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную *интенсивность*. Экспоненциальное распределение находит довольно широкое применение в теории массового обслуживания, описывает распределение наработки на отказ сложных

изделий, время безотказной работы элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Приведём примеры неблагоприятного сочетания условий работы деталей машин, вызывающих их внезапный отказ. Для зубчатой передачи это может быть действием максимальной нагрузки на наиболее слабый зуб при его зацеплении; для элементов радиоэлектронной аппаратуры – превышение допустимого тока или температурного режима. Плотность распределения экспоненциального закона (рис. 3.1) описывается соотношением

$$f(x) = \lambda t^{-\lambda x}; \quad (3.2)$$

функция распределения этого закона – соотношением

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x); \quad (3.3)$$

функция надёжности

$$P(x) = 1 - F(x) = \exp(-\lambda x); \quad (3.4)$$

математическое ожидание случайной величины  $X$

$$M_x = \int_0^{\infty} x \lambda \exp(-\lambda x) dx = \quad ; \quad (3.5)$$

дисперсия случайной величины  $X$

$$D_x = \int_0^{\infty} x \lambda^2 \exp(-\lambda x) - 1/\lambda^2 = 1/\lambda^2. \quad (3.6)$$

Экспоненциальный закон в теории надёжности нашёл широкое применение, так как он прост для практического использования. Почти все задачи, решаемые в теории надёжности, при использовании экспоненциального закона оказываются намного проще, чем при использовании других законов распределения. Основная причина такого упрощения состоит в том, что при экспоненциальном законе вероятность безотказной работы зависит только от длительности интервала и не зависит от времени предшествующей работы.

**Пример 3.2.** Нарботка на отказ очистного комбайна подчиняется экспоненциальному закону с параметром  $\lambda = 3 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ . Найти вероятность безотказной работы за время  $t = 100 \text{ ч}$ . Определить математическое ожидание наработки на отказ.

**Решение.** Для определения вероятности безотказной работы воспользуемся формулой (3.4), в соответствии с которой

$$P(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-3 \cdot 10^{-4} \cdot 100) = 0,998.$$

Математическое ожидание наработки на отказ равно

$$M_x = 1/\lambda = 1 / 3 \cdot 10^{-4} = 3,33 \cdot 10^3.$$

### 4.3. Нормальный закон распределения

Нормальный закон распределения часто называют законом Гаусса. Этот закон играет важную роль и наиболее часто используется на практике по сравнению с другими законами распределения.

Основная особенность этого закона состоит в том, что он является *предельным законом*, к которому приближаются другие законы распределения. В теории надёжности его используют для описания постепенных отказов, когда распределение времени безотказной работы вначале имеет низкую плотность, затем максимальную и далее плотность снижается.

Распределение всегда подчиняется нормальному закону, если на изменение случайной величины оказывают влияние многие, примерно равнозначные факторы.

Нормальный закон распределения описывается следующей зависимостью:

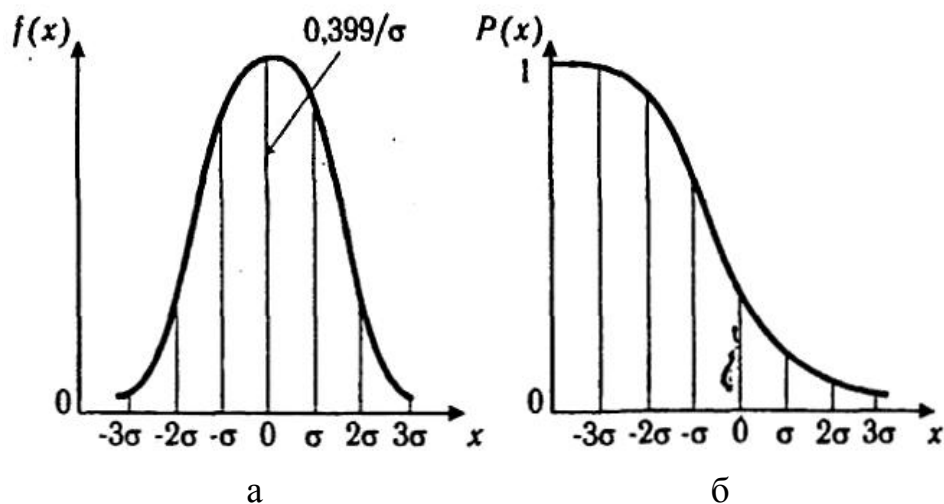
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (3.7)$$

где  $e = 2,71828$  – основание натурального логарифма;

$\pi = 3,14159$ ;

$m$  и  $\sigma$  – параметры распределения, определяемые по результатам испытаний;  $X$  – случайная величина.

Кривая плотности распределения приведена на рис. 3.2.



**Рис. 3.2. Кривые плотности вероятности (а) и функции надежности (б) нормального распределения**

Параметр  $m = Mx$  представляет собой среднее значение случайной величины  $X$ , оцениваемое по формуле

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.8)$$

параметр  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение случайной величины  $X$ , оцениваемое по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2} \quad (3.9)$$

Интегральная функция распределения имеет вид

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\{- (x-m)^2 / 2\sigma^2\} dx, \quad (3.10)$$

вероятность отказа и вероятность безотказной работы соответственно  $Q(x) = F(x)$ ,  $P(x) = 1 - F(x)$ .

Вычисление интегралов заменяют использованием таблиц нормального распределения, при котором  $Mx = 0$  и  $\sigma = 1$ . Для этого распределения функция плотности вероятности имеет одну переменную  $t$  и выражается зависимостью.

$$f_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-t^2/2), \quad (3.11)$$

Величина  $t$  является центрированной (так как  $Mt = 0$ ) и нормированной (так как  $\sigma_t = 1$ ).

Функция распределения (**функция Лапласа**) соответственно запишется в виде:

$$F_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp(-t^2/2) dt, \quad (3.12)$$

Из этого уравнения следует, что  $F_0(t) + F_0(-t) = 1$  или  $F(t) = 1 - F_0(t)$ .

При использовании табл. 1 приложения [4] следует в формулу (3.13) вместо  $t$  подставить

ее значение:

$$t = (t - Mx)/\sigma, \quad (3.13)$$

при этом  $t$  называют *квантилью нормированного нормального распределения* (обычно обозначают  $u_p$ ).

Плотность распределения и вероятность отказа соответственно равны:

$$f(x) = f_0(t)/\sigma; \quad Q(x) = F_0(t);$$

тогда вероятность безотказной работы

$$P(x) = 1 - F_0(t), \text{ где } f_0(t) \text{ и } F_0(t), \text{ определяют по таблицам.}$$

В табл. 1 П1 приложения [4] приведены значения  $\Phi^*(t)$  в зависимости от  $t = x = (t - Mx)/\sigma$ .

В работах по надежности часто вместо интегральной функции распределения  $F_0(t)$  используют **функцию Лапласа**:

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp(-t^2/2) dt, \quad (3.14)$$

При этом,

$$F_0(t) = \int_{-\infty}^0 f_0(t) dt + \int_0^t f_0(t) dt = 0.5 + \Phi^*(t) \quad (3.15)$$

Вероятности отказа и безотказной работы, выраженные через функцию Лапласа:

$$(x - Mx) / \sigma$$

$$Q(x) = 0.5 + \Phi^* \left( \frac{(x - Mx)}{\sigma} \right), \quad P(x) = 0.5 - \Phi^* \left( \frac{(x - Mx)}{\sigma} \right), \quad (3.16)$$

Вероятность попадания случайной величины  $X$  в заданный интервал значений от  $\alpha$  до  $\beta$  вычисляют по формуле

$$P(\alpha < x < \beta) = \Phi^* \left( \frac{(\beta - Mx)}{\sigma} \right) - \Phi^* \left( \frac{(\alpha - Mx)}{\sigma} \right). \quad (3.17)$$

**Пример 3.3.** Определить вероятность безотказной работы  $P(t)$  в течение  $t = 2 \cdot 10^4$  ч подшипника скольжения, если ресурс по износу подчиняется нормальному закону распределения с параметрами

$$Mt = 4 \cdot 10^4 \text{ ч}, \sigma = 10^4 \text{ ч.}$$

**Р е ш е н и е.** Находим квантиль

$$u_p = \frac{t - Mt}{\sigma} = (2 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4) / 10^4 = -2.$$

По табл. П.1 приложения [4] определяем, что  $P(t) = 0,0228$ .

**Пример 4.4.** Пусть случайная величина  $X$  представляет собой предел текучести стали. Опытные данные показывают, что предел текучести имеет нормальное распределение с параметрами  $M = 650$  МПа,  $\sigma = 30$  МПа. Найти вероятность того, что полученная плавка стали имеет предел текучести в интервале 600 — 670 МПа.

**Р е ш е н и е.** Для определения вероятности воспользуемся формулой (3.17)

$$P(600 < X < 670) = \Phi^*((670 - 650)/30) - \Phi^*((600 - 650)/30) = 0,697.$$

**Ответ:**  $P(X) = 0,697$ .

**Пример 3.5.** Случайная величина  $X$  распределена по нормальному закону и представляет собой ошибку измерения датчика давления. При измерении датчик имеет систематическую ошибку в сторону завышения на 0,5 МПа, среднее квадратическое отклонение ошибки измерения составляет 0,2 МПа.

Найти вероятность того, что отклонение измеряемого значения от истинного не превзойдет по абсолютной величине 0,7 МПа.

**Р е ш е н и е.** По формуле (3.17) с использованием табл.П.1 приложения определим

$$P(0,2 < X < 0,7) = \Phi^*((0,7 - 0,5)/(0,2)) - \Phi^*((0,2 - 0,5)/(0,2)) = 0,77.$$

**Ответ:**  $P(X) = 0,77$ .

#### 4.4. Гамма-распределение

Гамма-распределение является двухпараметрическим распределением. Оно занимает важное место в теории надежности. Плотность распределения имеет ограничение с одной стороны ( $0 \leq x < \infty$ ). Если параметр  $\alpha$  формы кривой распределения принимает целое значение, то это свидетельствует о вероятности появления такого же числа событий (например, отказов) при условии, что они независимы и появляются с постоянной интенсивностью  $\lambda$ .

Гамма-распределение широко применяют при описании появления отказов стареющих элементов, времени восстановления, наработки на отказ

резервированных систем. При различных параметрах гамма-распределение принимает разнообразные формы, что и объясняет его широкое применение.

Плотность вероятности гамма-распределения определяется равенствами

$$f(x) = [\lambda^\alpha / \Gamma(\alpha)] x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}, \quad \text{при } x \geq 0; \quad (3.18)$$

$$f(x) = 0 \text{ при } x < 0,$$

где  $\lambda > 0, \alpha > 0$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx. \quad (3.19)$$

Кривая изменения плотности распределения приведена на рис. 4.5.

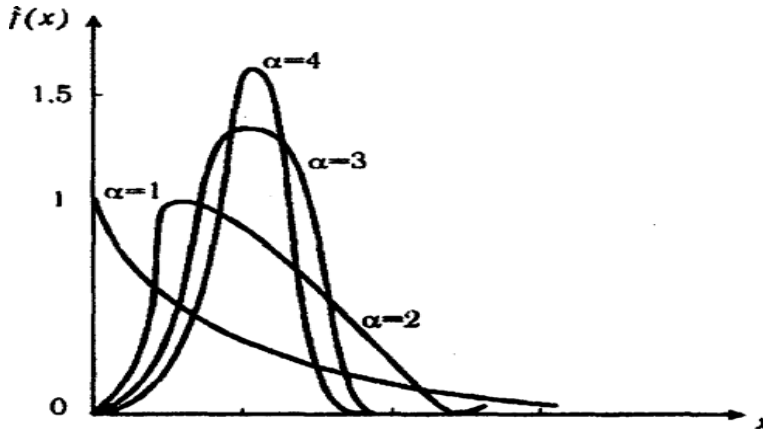


Рис. 4.3. Кривые плотности гамма-распределения

Функция распределения  $x$

$$F(x) = \lambda^\alpha / \Gamma(\alpha) \int x^{\alpha-1} e^{-\lambda x} dx \quad \text{при } x \geq 0; \quad (3.20)$$

$$F(x) = 0 \quad \text{при } x < 0.$$

Математическое ожидание и дисперсия соответственно равны:

$$Mx = \alpha/\lambda; Dx = \alpha/\lambda^2. \quad (3.21)$$

При  $\alpha < 1$  интенсивность отказов монотонно убывает (что соответствует периоду приработки изделия), при  $\alpha > 1$  — возрастает (что характерно для периода изнашивания и старения элементов).

При  $\alpha = 1$  гамма-распределение совпадает с экспоненциальным распределением, при  $\alpha > 10$  гамма-распределение приближается к нормальному закону. Если  $\alpha$  принимает значения произвольных целых положительных чисел, то такое гамма-распределение **называют распределением Эрланга**. Если  $\lambda = 1/2$ , а значение  $\alpha$  кратно  $1/2$ , то гамма-распределение совпадает с распределением  $\chi^2$  (хи-квадрат).



## Литература

6. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.
7. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
8. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.
9. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.
10. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.

## Лекция 4

### Основные понятия надёжности. Классификация отказов.

#### Составляющие надёжности.

Термины и определения, используемые в теории надёжности, регламентированные ГОСТ 27.002-89 «Надёжность в технике . Термины и определения».

#### 4.1. Основные понятия

**Надёжность** – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени и в заданных пределах значения установленных эксплуатационных показателей.

**Объект** – техническое изделие определённого целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Объектами могут быть различные системы и их элементы.

*Элемент* – простейшая составная часть изделия, в задачах надёжности может состоять из многих деталей.

*Система* – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная самостоятельного выполнения заданных функций.

Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной задачи. Например, улемочный комбайн при установлении его собственной надёжности рассматривается как система, состоящая из

отдельных элементов – механизмов, деталей и т.п., а при изучении надёжности технологической линии – как элемент.

Надёжность объекта характеризуется следующими основными *состояниями и событиями*.

**Исправность** – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

**Работоспособность** – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных НТД.

Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач.

Понятие **исправность** шире, чем понятие **работоспособность**. Работоспособный объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Таким образом, если объект неработоспособен, то это свидетельствует о его неисправности. С другой стороны, если объект неисправен, то это не означает, что он неработоспособен.

**Предельное состояние** – это состояние объекта, при котором его применение по назначению недопустимо или нецелесообразно.

Применение (использование) объекта по назначению прекращается в следующих случаях:

- при неустранимом нарушении безопасности;
- при неустранимом отклонении величин от заданных параметров;
- при недопустимом увеличении эксплуатационных расходов.

Для некоторых объектов предельное состояние является последним в его функционировании, т.е. объект снимается с эксплуатации, для других – определённой фазой в эксплуатационном графике, требующей проведения ремонтно-восстановительных работ.

В связи с этим объекты могут быть:

- **невосстанавливаемые**, для которых работоспособность в случае возникновения отказа, не подлежит восстановлению;
- **восстанавливаемые**, работоспособность которых может быть восстановлена, в том числе и путём замены.

К числу невосстанавливаемых объектов можно отнести,

Например: подшипники качения, полупроводниковые изделия, зубчатые колёса и т.п. Объекты, состоящие из многих элементов, например, проходческий комбайн, ленточный конвейер, электронная аппаратура, являются восстанавливаемыми, поскольку их отказы связаны с

повреждениями одного или немногих элементов, которые могут быть заменены.

В ряде случаев один и тот же объект в зависимости от особенностей, этапов эксплуатации или назначения может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

**Отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта. Критерий отказа – отличительный признак или совокупность признаков, согласно которым устанавливается факт возникновения отказа.

#### 4.2. Классификация и характеристики отказов

По типу отказы подразделяются на:

- **отказы функционирования** (выполнение основных функций объектом прекращается, например, поломка зубьев шестерни редуктора электродвигателя ленточного конвейера);

- **отказы параметрические** (некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах, например, потеря точности станка).

По природе отказы могут быть:

- **случайные**, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т.п.;

- **систематические**, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т.п.

Основные признаки классификации отказов:

- характер возникновения;
- причина возникновения;
- характер устранения;
- последствия отказов;
- дальнейшее использование объекта;
- легкость обнаружения;
- время возникновения.

Рассмотрим подробнее каждый из классификационных признаков:

<b>Характер возникновения</b>	- <b>внезапный отказ</b> – отказ проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта; - <b>постепенный отказ</b> – отказ, происходящий в результате -
-------------------------------	--

тате постепенного ухудшения качества объекта.

Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробой изоляции, обрывы и т. п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.

Постепенные отказы – связаны с износом деталей и старением материалов.

<b>Причина возникновения</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <b>конструкционный отказ</b>, вызванная недостатками и неудачной конструкцией объекта;</li><li>- <b>производственный отказ</b>, связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии;</li><li>- <b>эксплуатационный отказ</b>, вызванный нарушением правил эксплуатации.</li></ul>
<b>Характер устранения и последствия отказов</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <b>устойчивый отказ</b>;</li><li>- <b>перемежающийся отказ</b> (возникающий, исчезающий), последствия отказа: лёгкий отказ (легкоустраняемый);</li><li>- <b>средний отказ</b> (не вызывающий отказы смежных узлов - вторичные отказы);</li><li>- <b>тяжёлый отказ</b> (вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровью человека).</li></ul>
<b>Дальнейшее использование объекта</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <b>полные отказы</b>, исключающие возможность работы объекта до их устранения;</li><li>- <b>частичные отказы</b>, при которых объект может частично использоваться;</li></ul>
<b>Лёгкость обнаружения</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <b>очевидные</b> (явные) отказы;</li><li>- <b>скрытые</b> (неявные) отказы.</li></ul>
<b>Время возникновения</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <b>приработанные отказы</b>, возникающие в начальный период эксплуатации;</li><li>- <b>отказы при нормальной эксплуатации</b>;</li><li>- <b>износные отказы</b>, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и пр.</li></ul>

#### 4.3. Составляющие надёжности

Надёжность является *комплексным* свойством, включающем в себя в зависимости от назначения объекта или условий его эксплуатации *ряд простых свойств*:

- *безотказность*;
- *долговечность*;
- *ремонтпригодность*;
- *сохраняемость*.

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

*Наработка* – продолжительность или объём работы объекта, измеряемая в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружения, километры пробега и т.п.).

**Долговечность** – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

**Ремонтпригодность** – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособности путём проведения ремонтов и технического обслуживания.

**Сохраняемость** – свойство объекта непрерывно сохранять требуемые эксплуатационные показатели в течение (и после) срока хранения и транспортирования.

В зависимости от объекта надёжность может определяться всеми перечисленными свойствами или частью их. Например, надёжность колеса зубчатой передачи, подшипников определяется их долговечностью, а станка - долговечностью, безотказностью и ремонтпригодностью.

#### **4.4. Основные показатели надёжности**

**Показатель надёжности** количественно характеризует, в какой степени данному объекту присущи определённые свойства, обуславливающие надёжность. Одни показатели надёжности (технический ресурс, срок службы) могут иметь размерность, ряд других (вероятность безотказной работы, коэффициент готовности) являются безразмерными.

Рассмотрим показатели составляющей надёжности – долговечность.

**Технический ресурс** – наработка объекта от начала эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния. Технический ресурс может быть регламентирован :

- до среднего, капитального , от капитального до ближайшего среднего ремонта и т.п. Если регламентация отсутствует, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех видов ремонтов.

Для невосстанавливаемых объектов понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

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

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации (хранение, ремонт и т.п.) от её начала до наступления предельного состояния.

На рис. Приведена графическая интерпретация перечисленных показателей, при этом:

$t^0 = 0$  – начало эксплуатации;

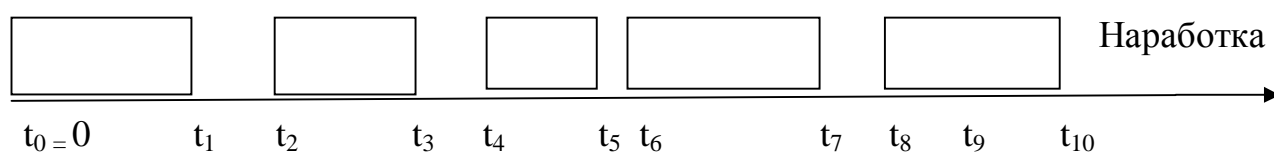
$t_1, t_5$  – моменты отключения по технологическим причинам;

$t_2, t_4, t_6, t_8$  – моменты включения объекта;

$t_3, t_7$  – моменты вывода объекта в ремонт, соответственно, средний и капитальный;

$t_9$  – момент прекращения эксплуатации;

$t_{10}$  – момент отказа объекта.



Технический ресурс (наработка до отказа).

$$TR = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8).$$

Назначенный ресурс

$$TN = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8).$$

**Срок службы объекта**

$$TC = t_{10}.$$

Для большинства технических объектов в качестве критерия долговечности чаще всего используется технический ресурс.

## Литература

11. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.

12. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.

13. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.

14. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.

15. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.

## Лекция 5.

### Теория вероятностей в математических расчетах надёжности технических систем

**Теория вероятностей** – математическая наука, изучающая закономерности в случайных явлениях.

#### 5.1. Основные понятия теории множеств

Одним из основных понятий является случайное событие.

**Событием** называется всякий факт (исход), который в результате опыта (испытания, эксперимента) может произойти или не произойти [9].

Каждому из таких событий соответствует определенное число – **вероятность** совершения этого события.

Теории вероятностей основывается на аксиоматическом подходе и опирается на элементарные понятия теории множеств.

**Множество** – это любая совокупность объектов произвольной природы. Каждый объект называется элементом этого множества.

Предположим, что производится некоторый опыт (эксперимент, испытание), результат которого заранее неизвестен, случаен [9]. Тогда

множество  $\Omega$  всех возможных исходов опыта представляет пространство элементарных событий, а каждый его элемент  $\alpha \in \Omega$  ( $\alpha$  принадлежит множеству  $\Omega$ ) является элементарным событием. Любой набор элементарных событий (любое их сочетание) считается **подмножеством** (частью) множества  $\Omega$  и является случайным событием, т. е. любое событие

$A$  – это подмножество множества  $\Omega$  :  $A \subset \Omega$  ( $A$  является подмножеством  $\Omega$ ).

Множество  $A$  считается заданным, если указано характеристическое свойство элементов этого множества, т. е. такое свойство, которым обладают все элементы этого множества и только они. Одним из основных понятий множеств является понятие принадлежности элемента множеству.

В качестве обозначения того, что предмет  $a$  принадлежит множеству  $A$ , пишут  $a \in \Omega$ . Если  $a$  принадлежит  $A$  (не принадлежит  $A$ ), то пишут  $a \in \Omega$  ( $a \notin \Omega$ ). Может случиться, что характеристическим свойством, определяющим множество  $A$ , не обладает вообще ни один предмет; тогда говорят, что множество  $A$  пустое и пишут  $A = \emptyset$ . Например, множество действительных решений уравнения  $x^2 = -1$  пустое. Если каждый элемент множества  $A$  является в то же время элементом множества  $B$ , то множество  $A$  называется подмножеством множества  $B$  и пишут  $A \subset B$ . Если одновременно выполнено  $A \subset B$  и  $B \subset A$  то говорят, что множества  $A$  и  $B$  равны и пишут  $A = B$ .

Объединением множеств  $A$  и  $B$  называется множество, состоящее из всех элементов, принадлежащих хотя бы одному из множеств  $A$  и  $B$ . Пересечением множеств  $A$  и  $B$  называется множество, состоящее из всех элементов, принадлежащих как  $A$ , так и  $B$ . Операции объединения и пересечения коммутативны, ассоциативны и взаимно дистрибутивны.

Например,  $(A \cup B) \cap C = (A \cap C) \cup (B \cap C)$ . Во многих разделах теории множеств рассматриваются только такие множества, которые содержатся в некотором фиксированном множестве  $X$ . Если  $A$  – подмножество  $X$  и  $P$  – свойство, характеризующее элементы из  $A$ , то пишут  $A = \{x \in X : P(x) \text{ - истина}\}$ . Например, если  $X$  – множество всех действительных чисел, а  $A$  – подмножество положительных чисел, то  $A = \{x \in X : x > 0\}$ . Если  $A$ , то множество  $X \setminus A = \{x \in X : x \notin A\}$  называется дополнением множества  $A$ . Операции объединения, пересечения и дополнения связаны т. н. законами де Моргана. Например,  $X \setminus (A \cap B) = (X \setminus A) \cup (X \setminus B)$  [10].



Событие  $A$  может появиться с одной из гипотез  $H_2, H_3, \dots, H_n$ , т. е.  $A = A_{H_2} \vee A_{H_3} \vee \dots \vee A_{H_n}$ , но  $H_2, H_3, \dots, H_n$  несовместны ( $\vee$  – несовместность), но зависимы от появления гипотезы  $H_i$   $P(A|H_i) = P(H_i) \cdot P(A/H_i)$

( $\wedge$  – зависимость), поэтому  $P(A) = P(A \wedge H_1) + \dots + P(A \wedge H_n) = \sum_{i=1}^n P(A|H_i) \cdot P(H_i)$ .

В общем случае, если множество  $\Omega$  содержит  $n$  элементов, то в нём можно выделить  $2^n$  подмножеств событий [9].

Раздел математики, который занимается исследованием операций над множествами (не только конечных, но и бесконечных операций), наз. алгеброй множеств. Алгебра множеств в свою очередь является частным случаем теории булевых алгебр.

### **Введём ряд определений.**

**Совместные (несовместные) события** – такие события, появление одного из которых не исключает (исключает) возможности появления другого.

**Зависимые (независимые) события** – такие события, появление одного из которых влияет (не влияет) на появление другого события.

**Противоположное событие** относительно некоторого выбранного события  $A$  – событие, состоящее в не появлении этого выбранного события (обозначается  $\bar{A}$ ).

**Полная группа событий** – такая совокупность событий, при которой в результате опыта должно произойти хотя бы одно из событий этой совокупности. Очевидно, что события  $A$  и  $\bar{A}$  составляют полную группу событий.

*Одна из причин применения теории множеств в теории вероятностей заключается в том, что для множеств определены важные преобразования, которые имеют простое геометрическое представление и облегчают понимание смысла этих преобразований.*

## **5.2. Аксиомы теории вероятностей**

Сопоставим каждому событию  $A$  число, называемое, как и прежде, его вероятностью и обозначаемое  $P(A)$  или  $P\{A\}$ . Вероятность выбирают так, чтобы она удовлетворяла следующим условиям или аксиомам:

$$P(\Omega) = 1; P(\emptyset) = 0. \quad (1)$$

$$P(\emptyset) \leq P(A) \leq P(\Omega). \quad (2)$$

Если  $A_i$  и  $A_j$  несовместные события, т. е.  $A_i \cap A_j = \emptyset$  ( $\forall$  -  $A_i$  несовместно с  $A_j$ ), то пишем

$$P(A_i \cap A_j) = P(A_i) + P(A_j) \quad (\forall \text{ - не зависит}) \quad (3)$$

Приведенные аксиомы постулируются, и попытка доказать их лишена смысла. Единственным критерием справедливости является степень, с которой теория, построенная на их основе, отражает реальный мир.

Аксиому (3) можно обобщить на любое конечное число несовместных событий  $\{A_i\}^n, i=1$ :

$$P\left\{\bigcup_{i=1}^n A_i\right\} = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (4)$$

С помощью аксиом можно вычислить вероятности любых событий (подмножеств пространства  $\Omega$ ), используя вероятности элементарных событий. Вопрос о том, как определить вероятности элементарных событий, является риторическим. На практике они определяются либо из соображений, связанных с возможными исходами опыта (например, в случае бросания монеты естественно считать вероятности выпадения орла или решки одинаковыми), или на основе опытных данных (частот).

Последний подход широко распространен в прикладных инженерных задачах, поскольку позволяет косвенно соотнести результаты анализа с физической реальностью.

Предположим, что в опыте пространство можно представить в виде полной группы несовместных и равновозможных событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$ . Согласно (3) их сумма представляет достоверное событие:

$$\bigcup_{i=1}^n A_i = \Omega, \quad (5)$$

так как события  $A_1, A_2, \dots, A_n$  несовместны, то согласно аксиомам (1) и (3):

$$P\left\{\bigcup_{i=1}^n A_i\right\} = \sum_{i=1}^n P(A_i) = P(\Omega) = 1. \quad (6)$$

Поскольку события  $A_1, A_2, \dots, A_n$  равновозможны, то вероятность каждого из них одинакова и равна

$$P(A_1) = P(A_2) = \dots = P(A_n) = \frac{1}{n}.$$

Отсюда непосредственно получается **частотное определение вероятности** любого события  $A$ :

$$P(A) = \frac{m_A}{n}, \quad (7)$$

как отношение числа случаев ( $m_A$ ), благоприятных появлению события  $A$ , к общему числу случаев (возможному числу исходов опыта)  $n$ .

Совершенно очевидно, что частотная оценка вероятности есть не что иное как **следствие аксиомы сложения вероятностей**. Представив, что число  $n$  неограниченно возрастает, можно наблюдать **явление, называемое статистическим упорядочением**, когда частота события  $A$  все меньше изменяется и приближается к какому-то постоянному значению, которое и представляет вероятность события  $A$ .

### 5.3. Основные правила теории вероятностей

Вероятности сложных событий можно вычислять с помощью вероятностей более простых, пользуясь основными правилами (теоремами): сложения и умножения вероятностей.

#### Теорема сложения вероятностей.

Если  $A_1, A_2, \dots, A_n$  - несовместные события и  $A$  – сумма этих событий, то вероятность события  $A$  равна сумме вероятностей событий  $A_1, A_2, \dots, A_n$ :

$$P(A) = P\left\{\bigcup_{i=1}^n A_i\right\} = \sum_{i=1}^n P(A_i). \quad (8)$$

Эта теорема непосредственно следует из аксиомы сложения вероятностей (3).

В частности, поскольку два противоположных события  $A$  и несовместны и образуют полную группу, то сумма их вероятностей

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1 \quad (9)$$

#### Теорема умножения вероятностей.

**Условная вероятность.** Чтобы сформулировать в общем случае теорему умножения вероятностей, введем понятие условной вероятности.

**Условная вероятность события  $A_1$  при наступлении события  $A_2$**  – вероятность события  $A_1$ , вычисленная в предположении, что событие  $A_2$  произошло:

$$P(A_1|A_2) = P(A_1 \cap A_2)/P(A_2). \quad (10)$$

Вероятность произведения (совместного появления) двух событий  $A_1$  и  $A_2$  (независимых) равна вероятности одного из них, умноженной на условную вероятность другого, в предположении, что первое событие произошло:

$$P(A_1 \wedge A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2 | A_1) = P(A_2) \cdot P(A_1 | A_2). \quad (11)$$

Для любого конечного числа событий теорема умножения имеет вид

$$P\left\{\bigcap_{i=1}^n A_i\right\} = P(A_1 | A_2 \dots A_n) \cdot P(A_2 | A_3 \dots A_n) \cdot \dots \cdot P(A_{n-1} | A_n) \cdot P(A_n). \quad (12)$$

В случае, если события  $A_1$  и  $A_2$  независимы, то соответствующие условные вероятности

$$P(A_1 | A_2) = P(A_1); \quad P(A_2 | A_1) = P(A_2), \quad (13)$$

поэтому теорема умножения вероятностей принимает вид

$$P(A_1 \wedge A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2), \quad (14)$$

а для конечного числа  $n$  независимых событий

$$P\left\{\bigcap_{i=1}^n A_i\right\} = \prod_{i=1}^n P\{A_i\}. \quad (15)$$

Следствием правил сложения и умножения вероятностей является: **теорема о повторении опытов (схема Бернулли) – опыты считаются независимыми, если вероятность того или иного исхода каждого из них не зависит от того, какие исходы имели другие опыты; формула полной вероятности (ФПВ) и формула Байеса, которые находят широкое применение при решении большого числа задач.**

### 5.3.1. Формула Бернулли

Пусть в некотором опыте вероятность события  $A$  равна  $P(A) = p$ , а вероятность того, что оно не произойдет  $P(\bar{A}) = q$ , причем, согласно (3)

$$P(A) + P(\bar{A}) = p + q = 1 \quad (16)$$

Если проводится  $n$  независимых опытов, в каждом из которых событие  $A$  появляется с вероятностью  $p$ , то вероятность того, что в данной серии опытов событие  $A$  появляется ровно  $m$  раз, определяется по выражению

$$P_n(m) = \{ \text{событие } A \text{ произошло } m \text{ раз} \} = C_n^m p^m q^{n-m}, \quad (17)$$

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

где -  $m!(n-m)!$  биномиальный коэффициент.

Например, вероятность однократной ошибки при чтении 32-разрядного слова в формате ЭВМ, представляющего комбинацию 0 и 1, при вероятности ошибки чтения двоичного числа  $p = 10^{-3}$ , составляет по (17)

$$P_{32}(1) = 1 * (10^{-3})^1 * (0,999)^{32} \approx 0,969$$

где  $q = 1 - p = 0,999$ ;  $n = 32$ ;  $m = 1$ .

Вероятность отсутствия ошибки чтения при  $m = 0$ ,  $C_{32}^0 = 1$

$$P_{32}(0) = 1 * (10^{-3})^0 * (0,999)^{32} \approx 0,969.$$

Часто возникают задачи определения вероятностей того, что некоторое событие А произойдет по меньшей мере  $m$  раз или не более  $m$  раз. Подобные вероятности определяются сложением вероятностей всех исходов, которые составляют рассматриваемое событие. Расчетные выражения для такого типа ситуаций имеют вид:

$$P\{\text{Событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах менее } m \text{ раз}\} = \sum_{i=0}^{m-1} P_n(i);$$

$$P\{\text{Событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах более } m \text{ раз}\} = \sum_{i=m+1}^n P_n(i);$$

$$P\{\text{Событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах не более } m \text{ раз}\} = \sum_{i=0}^m P_n(i);$$

$$P\{\text{Событие } A \text{ произойдет в } n \text{ опытах не менее } m \text{ раз}\} = \sum_{i=m}^n P_n(i);$$

где  $P_n(i)$  – вероятность  $i$ -го события определяется по формуле (17).

При больших  $n$  вычисление биномиальных коэффициентов  $C_n^m$  и возведение в большие степени  $p$  и  $q$  связано со значительными трудностями, поэтому целесообразно применять упрощенные способы расчетов. Приближение, называемое теоремой Муавра-Лапласа, используется, если  $npq \gg 1$ , а  $|m - np| < (npq)^{0,5}$ , в таком случае выражение (17) записывается:

$$P_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi npq}} \exp\left(-\frac{(m - np)^2}{2npq}\right). \quad (18)$$

### 5.3.2. Формула полной вероятности и формула Байеса (формула вероятностей гипотез)

В практике решения большого числа задач формула полной вероятности (ФПВ) и формула Байеса, являющиеся следствием основных теорем, находят широкое применение.

### **Формула полной вероятности.**

Если по результатам опыта можно сделать  $n$  исключаяющих друг друга предположений (гипотез)  $H_1, H_2, \dots, H_n$ , представляющих полную группу несовместных событий (для которой  $\sum_{i=1}^n H_i = \Omega$ ), то вероятность события  $A$ , которое может появиться только с одной из этих гипотез, определяется:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i) P(A|H_i), \quad (19)$$

где  $P(H_i)$  – вероятность гипотезы  $H_i$ ;  $P(A|H_i)$  – условная вероятность события  $A$  при гипотезе  $H_i$ .

Поскольку событие  $A$  может появиться с одной из гипотез  $H_2, H_3, \dots, H_n$ , то  $A = A_{H_2} \vee A_{H_3} \vee \dots \vee A_{H_n}$ , но  $H_2, H_3, \dots, H_n$  несовместны ( $\vee$  – несовместность), но зависимы от появления гипотезы  $H_1$  ( $P(A_{H_i}) = P(H_i) \cdot P(A|H_i)$ , ( $\wedge$  – зависимость)), поэтому

$$P(A) = P(A \wedge H_1) + \dots + P(A \wedge H_n) = \sum_{i=1}^n P(A_{H_i}). \quad (20)$$

### **Формула Байеса (формула вероятностей гипотез).**

Если до опыта вероятности гипотез  $H_1, H_2, \dots, H_n$  были равны  $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$ , а в результате опыта произошло событие  $A$ , то новые (условные) вероятности гипотез вычисляются:

$$P(H_j|A) = \frac{P(H_j) \cdot P(A|H_j)}{\sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(A|H_i)} = \frac{P(H_j) \cdot P(A|H_j)}{P(A)}. \quad (21)$$

Доопытные (первоначальные) вероятности гипотез  $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$  называются **априорными**, а послеопытные –  $P(H_1|A), \dots, P(H_n|A)$  – **апостериорными**.

Формула Байеса позволяет «пересмотреть» возможности гипотез с учетом полученного результата опыта.

Доказательство формулы Байеса следует из предшествующего материала. Поскольку  $P(H_i \wedge A) = P(H_i) \cdot P(A|H_i) = P(H_i) \cdot P(H_i|A)$ : откуда, с учетом (21), получается выражение (22).

$$P(H_i|A) = \frac{P(H_i \wedge A)}{P(A)} = \frac{P(H_i) \cdot P(A|H_i)}{P(A)}, \quad (22)$$

Если после опыта, давшего событие А, проводится еще один опыт, в результате которого может произойти или нет событие А1, то условная вероятность этого последнего события вычисляется по (21), в которую входят не прежние вероятности гипотез P(H<sub>i</sub>), а новые - P(H<sub>i</sub>| А):

$$P(A_1|A) = \sum_{i=1}^n P(H_i|A) \cdot P(A_1|H_i \wedge A). \quad (23)$$

Выражение (23) называют формулой для *вероятностей будущих событий*.

## Литература

1. Надёжность технических систем: Справочник/Ю.К. Беляев, В.А. Богатырёв, В.В. Болотин и др.; Под ред. И.А.Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
2. Надёжность в машиностроении: Справочник. Под ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.
3. Калявин В.П. Надёжность и диагностика. – СПб., «Элмор», 1998. – 230 с.
4. Дружинин Г.В. Надёжность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
5. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надёжность автоматизированных систем управления технологическими процессами. – Энергоатомиздат, 1989. – 480 с.
6. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьёв А.Д.
7. Байхельт Ф., Франкен П. Надёжность и техническое обслуживание: Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969 – 506 с.
9. Надёжность технических систем (лекции). [www.kmtt.ru](http://www.kmtt.ru) Nadejnost' tehniceskikh system.pdf

## Лекция 6

### Показатели надёжности невосстанавливаемых

## **объектов**

### **6.1. Общие положения**

*Невосстанавливаемым* называют такой элемент (объект), который (которое) после работы до первого отказа заменяют на такой же элемент (объект), так как его восстановление в условиях эксплуатации невозможно. В качестве примеров невосстанавливаемых элементов можно назвать диоды, конденсаторы, триоды, микросхемы, гидроклапаны, пиропатроны и т.п. [1, 5].

Наиболее важные показатели надёжности невосстанавливаемых объектов – показатели безотказности, к которым относятся:

- вероятность безотказной работы;
- плотность распределения отказов;
- интенсивность отказов;
- средняя наработка до отказа.

Показатели надёжности представляются в двух вариантах:

- статистический (выборочные оценки);
- вероятностный.

Статистические выборочные оценки показателей получаются по результатам испытаний на надёжность.

Например, в ходе испытаний какого-то числа однотипных объектов получено конечное число интересующего нас параметра – наработки до отказа. Полученные числа представляют собой выборку некоего объёма из общей «генеральной совокупности», имеющей неограниченный объём данных о наработке до отказа объекта.

Количественные показатели, определённые для «генеральной совокупности», являются *истинными, достоверными (вероятностными) показателями*, поскольку объективно характеризуют случайную величину – наработку до отказа.

Показатели, определённые для выборки, и, позволяющие сделать какие-то выводы о случайной величине, являются *выборочными (статистическими) оценками*. Очевидно, что при достаточно большом числе испытаний (большой выборке) оценки *приближаются от вероятностных к истинным показателям*.

Вероятностная форма представления показателей удобна при аналитических расчётах, а статистическая – при экспериментальном исследовании надёжности.

### **6.2. Показатели надёжности невосстанавливаемого объекта (элемента)**



Пусть время работы невосстанавливаемого элемента представляет собой случайную величину  $\tau$ . В момент времени  $t = 0$  элемент начинает работать, а в момент  $t = \tau$  происходит его отказ, следовательно,  $\tau$  является временем жизни элемента [2, 3, 5]. Таким образом,  $\tau$  имеет случайный характер, и в качестве основного показателя надежности элемента можно назвать функцию распределения, которая выражается зависимостью вида

$$F(t) = P(\tau < t). \quad (6.1)$$

Функцию  $F(t)$  называют также вероятностью отказа элемента до момента  $t$ . Если элемент работает в течение времени  $t$  непрерывно, то существует *непрерывная плотность вероятности отказа*

$$f(t) = dF(t) / dt \quad (6.2)$$

Следующим показателем надежности является вероятность безотказной работы за заданное время  $t$  или *функция надежности*, которая является функцией, обратной функции распределения

$$P(t) = 1 - F(t) = P(\tau > t). \quad (6.3)$$

Графически функция надежности представляет собой монотонно убывающую кривую (рис. 6.1; при  $t=0$   $P(t=0)=1$ ; при  $t \rightarrow \infty$   $P(t=\infty)=0$ ).

В общем виде вероятность безотказной работы испытываемых элементов конструкций определяется как отношение числа элементов оставшихся испытания к начальному числу элементов поставленных на испытание:

$$P(t) = (N - n) / N, \quad (6.4)$$

где  $N$  - начальное число испытываемых элементов;

$n$  - число отказавших элементов за  $t$ ;

$n_0 = N - n$  -  $x$  - число изделий сохранивших работоспособность.

Важнейшим показателем невосстанавливаемого элемента является *среднее время безотказной работы* ( $T_0$ ), которое определяют как математическое ожидание случайной величины

$$T_0 = M[\tau] = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (6.5)$$

После преобразования:

$$T_0 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t P(t) | + \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (6.6)$$

*Среднее время безотказной работы* и *среднюю наработку до отказа* можно получить по результатам испытаний. Для этого нужно проводить испытания до тех пор, пока не откажет последний из элементов. Пусть *время*

жизни каждого из элементов соответственно равно  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ . Тогда средняя наработка до отказа

$$T_0 = (\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n) / N = (1/N) \sum_{i=1}^n \tau_i \quad (6.7)$$

- число элементов, сохранивших работоспособность.

Величина  $P(t)$  и вероятность появления отказа  $F$  в момент времени  $t$  связаны соотношением

$$P(t) + F(t) = 1, \quad (6.8)$$

откуда

$$F(t) = 1 - P(t) \quad (6.9)$$

или

$$F(t) = 1 - n_0/N. \quad (6.10)$$

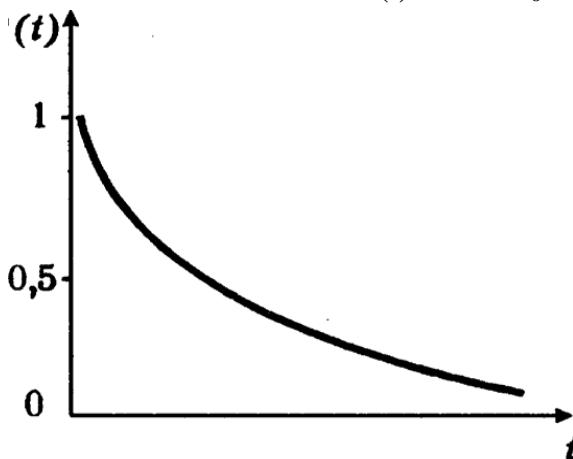


Рис. 6.1.Кривая функции надежности

Так как практически невозможно осуществить испытания всех элементов до отказа, то при большом значении  $n$  среднюю наработку до отказа можно определить по формуле

$$T_0 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n + (N - n) \cdot t}{N}, \quad (6.11)$$

где  $n$  — число отказавших элементов,  $N$  — число элементов, поставленных на испытания.

Следующей характеристикой надёжности невосстанавливаемого

элемента является интенсивность отказов, или опасность отказа, которая определяет надёжность элемента в каждый данный момент времени. Интенсивность отказа находят по формуле

$$\lambda(t) = f(t) / P(t) = -[dP(t) / dt] / P(t) = -P'(t) / P(t) \quad (6.12)$$

Вероятность безотказной работы в интервале  $(t_1, t_2)$  выражается зависимостью

$$P(t) = \exp \left\{ - \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right\} \quad (6.13).$$

Функция  $\lambda(t)$  может быть определена по результатам испытаний.

**Статистическая интенсивность отказов  $\lambda(t)$**  равна отношению числа отказов, происшедших в единицу времени, к общему числу неотказавших элементов к этому моменту времени.

Многочисленные опытные данные показывают, что для многих элементов функция  $\lambda(t)$  имеет корытообразный вид (рис. 2).

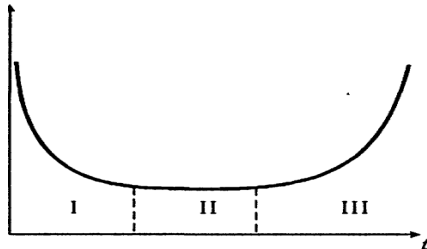


Рис. 2. Кривая интенсивности отказов во времени

Анализ графика показывает, что время испытания можно условно разбить на три периода. В первом из них функция  $\lambda(t)$  имеет повышенные значения. Это период приработки или период ранних отказов для скрытых дефектов. Второй период называют периодом нормальной работы. Для этого периода характерна постоянная интенсивность отказов. Последний, третий период — это период старения. Так как период нормальной работы является основным, то в расчетах надежности принимается  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ . В этом случае при экспоненциальном законе распределения функция надежности имеет вид:

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (6.14)$$

Среднее время жизни соответственно равно:

$$T_0 = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = 1/\lambda. \quad (6.15)$$

Поэтому функцию надежности можно записать и так:

$$P(t) = \exp(-t/T_0). \quad (6.16)$$

Если время работы элемента мало по сравнению со средним временем жизни, то можно использовать приближенную формулу

$$P(t) \approx 1 - t/T_0. \quad (6.17)$$

*Среднее время безотказной работы* ( $T_0$ ) является важнейшим показателем невосстанавливаемого элемента, которое определяют как математическое ожидание случайной величины

$$T_0 = M[\tau] = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (6.18)$$

После преобразования:

$$T_0 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t P(t) dt + \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (6.19)$$

*Среднее время безотказной работы и среднюю наработку до отказа* можно получить по результатам испытаний. Для этого нужно проводить испытания до тех пор, пока не откажет последний из элементов. Пусть *время жизни* каждого из элементов соответственно равно  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ . Тогда средняя наработка до отказа

$$T_0 = (\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n) / N = (1/N) \sum_{i=1}^n \tau_i \quad (6.20)$$

Если испытаниям подвергают  $N$  элементов и  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$  — время их жизни, то *статистическую дисперсию* находят из выражения

$$S_2 = 1/(N - 1) \sum_{i=1}^N (\tau_i - \tau)^2, \quad (6.21)$$

где  $\tau = (1/N) \sum \tau_i$ .

На практике в качестве оценки надежности чаще используют *среднее квадратическое отклонение* ( $\sigma$ ), которое определяют как корень квадратный из дисперсии:

$$\sigma[\tau] = \sqrt{D[\tau]}.$$

**Пример 6.1.** На испытания поставлено  $N = 100$  элементов. Испытания проводились в течение  $t = 200$  ч. В процессе проведения испытаний отказало  $n = 5$  элементов, при этом отказы зафиксированы в следующие моменты:

$$\tau_1 = 50 \text{ ч}; \tau_2 = 80 \text{ ч}; \tau_3 = 90 \text{ ч}; \tau_4 = 100 \text{ ч}; \tau_5 = 150 \text{ ч};$$

остальные элементы не отказали. Определить среднюю наработку до отказа  $T_0$ .

Решение. Для решения задачи воспользуемся формулой ()

$$T_0 = [(50+80+90+100+150)+(100-5)200]/100 = 194.7 \text{ ч.}$$

Ответ:  $T_0 = 194.7$ ч.

**Вероятность безотказной работы** в интервале  $(t_1, t_2)$  выражается зависимостью

$$P(t) = \exp\left\{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt\right\} \quad (6.22)$$

Функция  $\lambda(t)$  может быть определена по результатам испытаний. Предположим, что испытаниям подвергают  $N$  элементов. Пусть  $n(t)$  — число элементов, не отказавших к моменту  $t$ . Тогда при достаточно малом  $\Delta t$  и достаточно большом  $N$  получим

$$\lambda(t) = \Delta n / [\Delta t n(t)], \quad (6.23)$$

где  $\Delta n$  — число отказов на участке  $\Delta t$ .

**Пример 6.2.** По данным эксплуатации генератора установлено, что наработка до отказа подчиняется экспоненциальному закону с параметром  $\lambda = 2 \cdot 10^{-5}$  1/час.

Найти вероятность безотказной работы за время  $t = 100$  часов. Определить математическое ожидание наработки до отказа.

**Решение.**

Определим вероятность безотказной работы по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = \exp(-2 \cdot 10^{-5} \cdot 100) = 0,998.$$

Математическое ожидание наработки до отказа определяем по формуле :

$$M_0 = 1/\lambda = 1/(2 \cdot 10^{-5}) = 5 \cdot 10^4 \text{ ч.}$$

$$\text{Ответ: } P(t) = 0,998; M_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ ч.}$$

**Пример 6.3.** Построить кривую интенсивности отказов по данным табл. На испытания поставлено  $N$  элементов ( $N = 200$ ), испытания проводились в течение  $t = 100$  ч.

Таблица 6.1.

Результаты испытаний элемента (к примеру 6.3.)

№ п/п	$\Delta t$ , ч	$\Delta n$	$n(t)$	№ п/п	$\Delta t$ , ч	$\Delta n$	$n(t)$
1	0-10	10	190	6	50-60	2	168
2	10-20	8	182	7	60-70	2	166
3	20-30	6	176	8	70-80	4	162
4	30-40	4	172	9	80-90	5	157
5	40-50	2	170	10	90-100	8	149

Обозначения:  $\Delta t$  — интервал испытаний;  $\Delta n$  — число отказов;  $n(t)$  — число неотказавших элементов.

Для построения кривой (рис.) вычислим интенсивность отказов  $\lambda(t_i)$  ч<sup>-1</sup> по формуле

(6.25):

$$\lambda(t_1) = 10/(10 \cdot 190) = 0,0052; \lambda(t_2) = 8/(10 \cdot 182) = 0,0044;$$

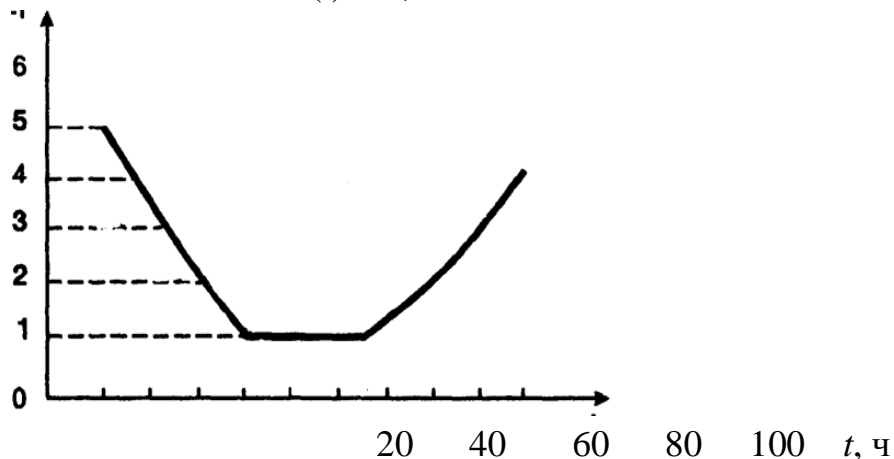
$$\lambda(t_3) = 6/(10 \cdot 176) = 0,0034; \lambda(t_4) = 4/(10 \cdot 172) = 0,0023;$$

$$\lambda(t_5) = 2/(10 \cdot 170) = 0,0011; \lambda(t_6) = 2/(10 \cdot 168) = 0,0011;$$

$$\lambda(t_7) = 2/(10 \cdot 166) = 0,0012; \lambda(t_8) = 4/(10 \cdot 162) = 0,0024;$$

$$\lambda(t_9) = 5/(10 \cdot 157) = 0,0032; \lambda(t_{10}) = 8/(10 \cdot 149) = 0,0053.$$

$$\lambda(t)10^{-3}, \text{ ч}^{-1}$$



**Рис. Кривая интенсивности отказов во времени**

## Литература

16. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.
17. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
18. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.
19. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.
20. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.
6. Надёжность технических систем (лекции). [www.kmtt.ru](http://www.kmtt.ru) Nadejnost' tehniceskikh system.pdf

## Лекция 7

### Показатели надежности восстанавливаемых объектов

#### 7.1. Показатели надежности восстанавливаемого объекта (элемента)

Большинство сложных технических систем с длительными сроками службы являются *восстанавливаемыми*, т.е. возникающие в процессе эксплуатации отказы систем устраняют при ремонте. Технически исправное состояние изделий в процессе эксплуатации поддерживают проведением профилактических и восстановительных работ.

Для осуществляемых в процессе эксплуатации изделий работ по поддержанию и восстановлению их работоспособности характерны значительные затраты труда, материальных средств и времени. Как правило, эти затраты за время эксплуатации изделия значительно превышают соответствующие затраты на его изготовление. Совокупность работ по поддержанию и восстановлению работоспособности и ресурса изделий подразделяют на *техническое обслуживание, и ремонт*, которые, в свою очередь, подразделяют на *профилактические работы*, осуществляемые в плановом порядке и *аварийные*, проводимые по мере возникновения отказов или аварийных ситуаций.

Свойство ремонтпригодности изделий влияет на материальные затраты и длительность простоев в процессе эксплуатации. Ремонтпригодность тесно связана с безотказностью и долговечностью изделий. Так, для изделий,

с высоким уровнем безотказности, как правило, характерны низкие затраты труда и средств на поддержание их работоспособности.

Показатели безотказности и ремонтпригодности изделий являются составными частями комплексных показателей, таких как коэффициенты готовности  $K_g$  и технического обслуживания  $K_t$  и..

К показателям надежности, присущим только восстанавливаемым элементам, следует отнести среднюю наработку на отказ, наработку между отказами, вероятность восстановления, среднее время восстановления, коэффициент готовности и коэффициент технического использования.

**Средняя наработка на отказ** — наработка восстанавливаемого элемента, приходящаяся, в среднем, на один отказ в рассматриваемом интервале суммарной наработки или определенной продолжительности эксплуатации:

$$T_0 = \frac{1}{m} (\sum_{t=1}^m t_i) \quad (7.1)$$

где  $t_i$  — наработка элемента до  $i$ -го отказа;

$m$  — число отказов в рассматриваемом интервале суммарной наработки.

**Нарработка между отказами** определяется объемом работы элемента от  $i$ -го отказа до  $(i + 1)$ -го, где  $i = 1, 2, \dots, m$ .

**Среднее время восстановления** одного отказа в рассматриваемом интервале суммарной наработки или определенной продолжительности эксплуатации

$$T_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{B_i} \quad (7.2)$$

где  $t_{B_i}$  — время восстановления  $i$ -го отказа;  $m$  — число отказов в рассматриваемом интервале суммарной наработки.

**Коэффициент готовности  $K_g$**  представляет собой вероятность того, что изделие будет работоспособно в произвольный момент времени, кроме периодов выполнения планового технического обслуживания, когда применение изделия по назначению исключено. Этот показатель является комплексным, так как он количественно характеризует одновременно два показателя: безотказность и ремонтпригодность.

В стационарном (установившемся) режиме эксплуатации и при любом виде закона распределения времени работы между отказами и времени восстановления коэффициент готовности определяют по формуле

$$K_g = T_0 / (T_0 + T_B) \quad (7.3)$$



где  $T_0$  — средняя наработка на отказ;

$T_B$  — среднее время восстановления одного отказа.

Таким образом, анализ формулы показывает, что надежность изделия является функцией не только безотказности, но и ремонтпригодности. Это означает, что низкая надежность может быть несколько компенсирована улучшением ремонтпригодности. Чем выше интенсивность восстановления, тем выше готовность изделия. Если время простоя велико, то готовность будет низкой.

**Коэффициент технического использования** - важная характеристика ремонтпригодности изделия, который представляет собой отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме этой наработки и времени всех простоев, обусловленных устранением отказов, техническим обслуживанием и ремонтами за этот период. Коэффициент технического использования представляет собой вероятность того, что изделие будет работать в надлежащем режиме за время  $T$ , характеризует долю времени нахождения элемента в работоспособном состоянии относительно рассматриваемой продолжительности эксплуатации. Таким образом,  $K_{ти}$  определяется двумя основными факторами — надежностью и ремонтпригодностью.

Период эксплуатации, для которого определяется коэффициент технического использования, должен содержать все виды технического обслуживания и ремонтов. Коэффициент технического использования учитывает затраты времени на плановые и неплановые ремонты, а также регламенты, и определяется по формуле

$$K_{ти} = t_n / (t_n + t_b + t_p + t_o), \quad (7.4)$$

где  $t_n$  — суммарная наработка изделия в рассматриваемый промежуток времени;  $t_b$ ,  $t_p$  и  $t_o$  — соответственно суммарное время, затраченное на восстановление, ремонт и техническое обслуживание изделия за тот же период времени.

## 7.2. Уравнение связи показателей надёжности

В лекциях 6 и 7 приведены выражения, определяющие вероятность безотказной работы (ВБР) и вероятность отказов (ВО) в функции плотности распределения отказов (ПРО)  $f(t)$ . Поскольку интенсивность отказов (ИО)  $\lambda(t)$  является более полной характеристикой надёжности, представляет интерес выразить ВБР  $P(t)$  через ИО.

Используя выражение для интенсивности отказов

$$\lambda(t) = f(t) / P(t)$$

запишем

$$dP(t) / dt = - \lambda(t) * P(t)$$

Разделяя переменные (умножив обе части на  $dt / P(t)$ ), получим

$$dP(t) / P(t) = - \lambda(t) * dt.$$

Интегрируя от 0 до  $t$  и принимая во внимание, что при  $t = 0$  ВБР объекта  $P(0) = 1$  получаем

$$\int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)} = \ln P(t) \Big|_0^t = \ln P(t) = \int_0^t \lambda(t) dt,$$

Откуда уравнение связи основных показателей надёжности имеет вид

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

Величина  $\int_0^t \lambda(t) dt$  - есть вероятность того, что элемент, безотказно проработавший в интервале наработки  $[0, t]$ , откажет в интервале  $[t, t + dt]$ .

Уравнение связи показывает, что все показатели надёжности  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$  равноправны в том смысле, что зная один из них, можно определить другие.

**Пример 7.1.** Определить коэффициент готовности объекта (элемента), если известно, что среднее время восстановления одного отказа равно  $T_B = 5$  ч, а среднее значение наработки на отказ составляет  $T_0 = 500$  ч.

**Решение.** Для определения коэффициента готовности воспользуемся формулой (8.3)

$$K_T = T_0 / (T_0 + T_B) = 500 / (500 + 5) = 0,99.$$

Ответ:  $K_T = 0,99$ .

**Пример 7.2.** Определить коэффициент технического использования машины, если известно, что машину эксплуатируют в течение года ( $T_{\Sigma} = 8760$  ч). За этот период эксплуатации машины суммарное время

восстановления отказов составило  $t_b = 40$  ч. Время проведения регламента составляет  $t_o = 20$  ч. Суммарное время, затраченное на ремонтные работы за период эксплуатации составляет 15 суток, т.е.  $t_p = 15 \times 24 = 360$  ч.

**Решение.** Коэффициент технического использования вычислим по формуле (8.4), но сначала определим суммарное время наработки машины:

$$t_n = T_{\Sigma} - (t_b + t_p + t_o) = 8760 - (40 + 360 + 20) = 8340 \text{ ч.}$$

$$K_{и} = t_n / (t_n + t_b + t_p + t_o) = t_n / T_{\Sigma} = 8340 / 8760 = 0,952.$$

Ответ:  $K_{и} = 0,952$ .

## Литература

1. Надёжность технических систем: Справочник/Ю.К. Беляев, В.А. Богатырёв, В.В. Болотин и др.; Под ред. И.А.Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
2. Надёжность в машиностроении: Справочник. Под ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.
3. Калявин В.П. Надёжность и диагностика. – СПб., «Элмор», 1998. – 230 с.
4. Дружинин Г.В. Надёжность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
5. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надёжность автоматизированных систем управления технологическими процессами. – Энергоатомиздат, 1989. – 480 с.
6. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьёв А.Д.
7. Байхельт Ф., Франкен П. Надёжность и техническое обслуживание: Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969 – 506 с.
9. Надёжность технических систем (лекции). [www.kmtt.ru Nadejnost' tehniceskikh system.pdf](http://www.kmtt.ru/Nadejnost%20tehniceskikh%20system.pdf)

## Лекция 8

### Математические зависимости для оценки надёжности технических систем

#### 8.1. Функциональные зависимости надёжности

Отказы, возникающие в процессе испытаний или эксплуатации, могут быть вызваны неблагоприятным сочетанием различных факторов — рассеянием действующих нагрузок, отклонением от номинального значения механических характеристик материалов, неблагоприятным сочетанием допусков в местах сопряжения и т. п. Поэтому в расчетах надёжности

технических систем различные параметры рассматривают как случайные величины, которые могут принимать то или иное значение, неизвестное заранее.

Различают случайные величины *прерывного* (дискретного) и *непрерывного* типов. Условимся случайные величины в дальнейшем обозначать большими буквами, а их возможные значения — соответствующими малыми. Для каждого числа  $x$  в диапазоне изменения случайной величины  $X$  существует определенная вероятность  $P(X < x)$  того, что  $X$  не превышает значения  $x$ . Вероятность этого события называют *функцией распределения*:

$$F(x) = P(X < x). \quad (8.1)$$

Функция распределения — универсальная характеристика, так как она является функцией как непрерывных, так и дискретных случайных величин. Функция  $F(x)$  относится к неубывающим функциям —  $x$  монотонно возрастает при непрерывных процессах и ступенчато возрастает при дискретных процессах. В пределах изменения случайной величины  $X$  эта функция изменяется от 0 до 1:

$$F(-\infty) = 0; F(\infty) = 1$$

Производную от функции распределения по текущей переменной называют *плотностью распределения*

$$f(x) = dF(x) / dx, \quad (8.2)$$

которая характеризует частоту повторений данного значения случайной величины. В теории надежности величину  $f(x)$  называют *плотностью вероятности*. Плотность распределения есть неотрицательная функция своего аргумента  $f(x) \geq 0$ .

Интеграл в бесконечных пределах от плотности распределения равен единице:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1.$$

В ряде случаев в качестве характеристик распределения случайных величин достаточно использовать некоторые числовые величины, среди

которых в теории надежности наиболее употребительными являются математическое ожидание (среднее значение), мода и медиана (характеризуют положение центров группирования случайных величин на числовой оси), дисперсия, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации (характеризуют рассеяние случайной величины). Значения  $n$ ,  $g$  характеристик, полученные по результатам испытаний или эксплуатации, называют **статистическими оценками**. Характеристики распределения используют для прогнозирования надежности.

Для дискретных случайных величин **математическое ожидание  $Mx$**  равно сумме произведений всех возможных значений  $X$  на вероятности этих значений:

$$Mx = \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (8.3)$$

Математическое ожидание для непрерывной случайной величины выражается интегралом в бесконечных пределах от произведения непрерывно изменяющихся возможных значений случайной величины на плотность распределения

$$Mx = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad (8.4)$$

Математическое ожидание случайной величины непосредственно связано с ее средним значением. При неограниченном увеличении числа опытов среднее арифметическое значение величины  $x$  приближается к математическому ожиданию и называется **оценкой среднего значения**:

$$\bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i \quad (8.5)$$

где  $n$  - общее число опытов;

$x_i$  - текущее значение случайной величины.

**Дисперсией ( $D$ )** случайной величины называют математическое ожидание квадрата отклонения этой величины от ее математического ожидания. Для дискретной случайной величины дисперсия равна:

$$Dx = \sum_{i=1}^n (x_i - Mx)^2 \quad (8.6)$$

Для непрерывной случайной величины дисперсия определяется из выражения

$$Dx = \int_{-\infty}^{\infty} (x - Mx)^2 f(x) dx. \quad (8.7)$$

Оценка дисперсии случайной величины:

$$D_x^* = (1/n-1) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (8.8)$$

Дисперсия случайной величины является характеристикой *рассеяния* — разбросанности значений случайной величины около ее математического ожидания. **Размерность дисперсии** соответствует квадрату размерности случайной величины. Для наглядности в качестве характеристики рассеяния удобнее использовать величину, размерность которой совпадает с размерностью случайной величины. Такой характеристикой может быть **среднее квадратическое отклонение  $\sigma_x$** , которое определяется как корень квадратный из дисперсии:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (8.9)$$

Для оценки рассеяния с помощью безразмерной величины используют **коэффициент вариации**, который равен:

$$v_x = \sigma_x / Mx. \quad (8.10)$$

**Модой** случайной величины называют ее наиболее вероятное значение или то ее значение, при котором плотность вероятности максимальна.

**Медиана** характеризует расположение *центра группирования случайной величины*.

Площадь под графиком функции плотности распределения делится медианой пополам.

**Квантиль** — значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности.

Квантиль, соответствующую **вероятности 0,5**, называют **медианой**.

Аналогично предыдущим характеристикам понятия моды и медианы даны в статистической трактовке. Для *симметричного модального* (т.е. имеющего один максимум) *распределения* математическое ожидание, мода и медиана совпадают.

**Пример 8.1.** Функция распределения непрерывной случайной величины  $X$  задана выражением

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0 \\ ax^3 & \text{при } 0 < x \leq 1 \\ 1 & \text{при } x > 1 \end{cases}$$

Найти коэффициент  $a$  и плотность распределения  $f(x)$ .

**Решение.** Так как функция распределения случайной величины  $X$  непрерывна, то при  $x=1$ ,  $ax^3 = 1$ , откуда  $a = 1$ .

Плотность распределения выражается соотношением

$$f(x) = dF/dx = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0 \\ 3ax^2 & \text{при } 0 < x \leq 1 \\ 0 & \text{при } x > 1 \end{cases}$$

**Пример 8.2.** Плотность распределения случайной величины  $X$  описывается выражением

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0 \text{ или } x > 1 \\ ax & \text{при } 0 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Найти математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной величины.

**Решение.** Математическое ожидание найдем по формуле (7.4):

$$M = \int_0^1 xf(x) dx = \int_0^1 xax dx = a/3$$

Для определения дисперсии используем формулу (5.7):

$$Dx = \int_0^1 (x - a^2/3)ax dx = a(1/4 - 2a/9 + a^2/18).$$

Среднее квадратическое отклонение соответственно равно:

$$\sigma_x = \sqrt{Dx} = \sqrt{a(1/4 - 2a/9 + a^2/18)}.$$

**Пример 8.3.** При проведении одного опыта может появиться или не появиться некоторое событие  $A$ . Вероятность появления события  $A$  равна  $p$ , а вероятность не появления этого события -  $1 - p = q$ .

Определить математическое ожидание, дисперсию и среднеквадратическое отклонение случайной величины  $X$  — число появлений события  $A$ .

**Решение.** Ряд распределения случайной величины  $X$  можно записать в виде таблицы:

$x_i$	0	1
$p_i$	$q$	$p$

По формуле (7.3) находим математическое ожидание:

$$Mx = \sum_{i=0}^1 x_i p_i = 0q + 1p = p.$$

Дисперсию величины  $X$  определим по формуле (5.6).

$$Dx = \sum (x_i - Mx)^2 p_i = pq$$

Среднее квадратическое отклонение равно:

$$\sigma = \sqrt{Dx} = \sqrt{pq}.$$

**Пример 8.4.** При эксплуатации сложной технической системы получены статистические данные, которые сведены в таблицу. Определить коэффициент готовности системы.

Таблица

Статистические данные, полученные при эксплуатации сложной технической системы

Номер системы, п.п	Число отказов $m_i$	Время, ч		Суммарное восстановление $m_i t_{в,i}$
		восстановление отказа, $t_{в,i}$	Работы, $t_p$	



1	2	1	200	2
2	5	2	300	10
3	6	4	400	24
4	4	3	300	12
5	8	2	600	16
6	10	5	700	50
7	15	2	900	30
8	20	3	1000	60
Всего	70	-	4400	204

Наработка на отказ

$$T_0 = \sum_{i=1}^8 t_{p,i} / \sum_{i=1}^8 m_i = 4400 / 70 = 62,8 \text{ ч.}$$

Среднее время восстановления

$$T_B = \sum_{i=1}^8 m_i t_{B,i} / \sum_{i=1}^8 m_i = 204 / 70 = 2,9 \text{ ч.}$$

По формуле (8.3) по вычисленным значениям  $T_0$  и  $T_B$  находим коэффициент готовности системы:

$$K_r = 62,8 / (62,8 + 2,9) = 0,95$$

## Литература

1. Надёжность технических систем: Справочник/Ю.К. Беляев, В.А. Богатырёв, В.В. Болотин и др.; Под ред. И.А.Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
2. Надёжность в машиностроении: Справочник. Под ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.
3. Калявин В.П. Надёжность и диагностика. – СПб., «Элмор», 1998. – 230 с.
4. Дружинин Г.В. Надёжность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
5. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надёжность автоматизированных систем управления технологическими процессами. – Энергоатомиздат, 1989. – 480 с.
6. Байхельт Ф., Франкен П. Надёжность и техническое обслуживание: Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969 – 506 с.
8. Надёжность технических систем (лекции). [www.kmtt.ru](http://www.kmtt.ru) Nadejnost' tehnicheskih system.pdf

## Надежность технических систем

### 9.1. Выбор и обоснование показателей надежности технических систем

Одной из важнейших задач на этапе проектирования является правильный выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности. Необоснованный выбор показателей надежности из широкой номенклатуры имеющихся показателей может привести к неправильным решениям при проектировании системы. Поэтому при выборе показателей надежности необходимо учитывать назначение системы, условия и режимы ее работы, а также ее ремонт-топригодность.

Информация о назначении системы дает возможность определить область и интенсивность применения системы по назначению. Сведения об условиях и режимах работы системы используют для оценки влияния факторов окружающей среды на работоспособность проектируемой системы, а также влияния действующих внешних и внутренних нагрузок на несущую способность элементов системы. Количественные значения этих оценок являются исходными данными для расчета прочности и устойчивости элементов и узлов металлоконструкций.

Если по условиям применения систему предполагается ремонтировать в условиях эксплуатации, то в качестве одного из основных показателей надежности следует выбирать коэффициент готовности  $K_g$  или коэффициент технического использования  $K_{и}$ .

В случае, если отказ системы или отдельных ее элементов приводит к невыполнению важной задачи или нарушает безопасность работы обслуживающего персонала, а также вызывает угрозу для здоровья и жизни людей, находящихся в зоне действия системы, то для таких систем основным показателем надежности является безотказность, выражающаяся в виде наработки на отказ или вероятности безотказной работы.

Если в результате простоя системы после отказа возникают большие материальные затраты, то такая система должна иметь хорошую ремонтпригодность и высокие показатели безотказности.

Если система по условиям эксплуатации подлежит длительному хранению (ожиданию работы) или она должна транспортироваться на

специальных транспортных средствах, то такая система должна обладать высокими показателями сохраняемости в соответствующих условиях хранения и транспортирования.

Все показатели надежности проектируемой системы должны обеспечивать нормальное ее функционирование в течение заданного срока эксплуатации.

## 9.2. Распределение нормируемых показателей надежности

Распределение норм надежности проводят на этапах эскизного и рабочего проектирования технической системы. Предполагается, что на любом из этих этапов конструирования систему можно разбить на некоторое число подсистем в виде отдельных сборочных единиц и исходить из начальной надежности каждой подсистемы, полученной расчетом или по результатам испытаний подсистем.

Пусть  $p_1, p_2, \dots, p_n$  означают надежность подсистем. Предположим, что отказ любой подсистемы приводит к отказу системы в целом, тогда надежность системы на основании теоремы умножения вероятностей имеет вид:

$$P = p_1 p_2 \dots p_n. \quad (9.1)$$

Пусть  $P_{тр}$  - требуемая надежность системы, причем значение надежности должно удовлетворять условию  $P_{тр} \geq P$ . Задача состоит в том, чтобы повысить хотя бы одно из значений  $p_i$  на столько, чтобы  $P \geq P_{тр}$ . Для повышения надежности необходимо произвести дополнительные затраты, связанные либо с введением резервирования в этой системе, либо с введением в систему более надежных элементов.

Методика повышения надежности  $P$  до требуемого значения  $P_{тр}$  сводится к следующему. Надежности  $p_1, p_2, \dots, p_n$  располагают в

последовательности:

$$p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_n. \quad (9.2)$$

Каждую из надежностей  $p_1, p_2, \dots, p_k$  увеличивают до одного и того же значения  $p_0^{тр}$ , а надежности, начиная с  $p_{k+1}, \dots, p_n$ , остаются неизменяемыми. Номер  $k$  выбирают из максимального значения  $j$ , для которого

$$n+1$$

$$p_j < [P_{\text{тр}} / \prod_{j=1}^{n+1} p_j]^{1/j} = p_j, \quad (9.3)$$

где  $p_{n+1} = 1$  по определению.

Значение  $p_{0\text{тр}}$  определяют из соотношения

$$p_{0\text{тр}} = [P_{\text{тр}} / \prod_{j=k+1}^{n+1} p_j]^{1/k} = p_{0\text{тр}} \quad (9.4)$$

Очевидно, что надежность системы после определения  $P_{0\text{тр}}$  будет удовлетворять заданному требованию, поскольку новая надежность равна:

$$(P_{0\text{тр}})^k p_{k+1} \dots p_n = (P_{0\text{тр}})^k \prod_{j=k+1}^{n+1} p_j = P_{\text{тр}} \quad (9.5)$$

**Пример 9.1.** Пусть техническая система состоит из трех подсистем. Надежность каждой из них соответственно равна:  $p_1 = 0,7$ ;  $p_2 = 0,8$ ;  $p_3 = 0,9$ . Известно, что отказ любой одной подсистемы приводит к отказу системы в целом. Требуемое значение надежности системы равно  $P_{\text{тр}} = 0,65$ .

Провести перераспределение норм надежности таким образом, чтобы произведение вероятностей трех подсистем соответствовало заданному требованию.

**Решение.** Используя формулу (9.1), получим:

$$P = p_1 p_2 p_3 = 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 0,504.$$

Предположим, что мы не рассчитываем  $k$  по формуле (9.3), а произвольно задаем  $k = 1$ .

Тогда, подставляя исходные данные в формулу (9.4), получим:

$$p_{0\text{тр}} = [0,65 / (0,8 \cdot 0,9 \cdot 1,0)]^{1/1} = 0,903.$$

$$P = 0,903 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 0,65.$$

Полученное значение надежности соответствует требуемому  $P_{\text{тр}} = 0,65$ .

Однако на основании полученного значения  $p_{0\text{тр}}$  можно заключить, что распределение средств, необходимых для повышения надежности, не было оптимальным. Другими словами, приложено больше средств для достижения заданного показателя, чем требовалось.

Определим теперь  $k$  по формуле (9.3). С этой целью вычислим три величины:

$$r_1 = [P_{\text{тр}} / p^2 p^3 1,0]^{1/1} = [0,65 / (0,8 \cdot 0,9 \cdot 1,0)]^{1/1} = 0,903;$$

$$r_2 = [P_{\text{тр}} / p^3 1,0]^{1/2} = [0,65 / (0,9 \cdot 1,0)]^{1/2} = 0,85;$$

$$r_3 = [P_{\text{тр}} / 1,0]^{1/3} = [0,65 / 1,0]^{1/3} = 0,866.$$

Так как  $p_1 < r_1$ ,  $p_2 < r_2$ ,  $p_3 > r_3$ , примем  $k = 2$ . В этом случае наибольшее значение индекса  $j$  со свойством  $p < r$ , равно двум. Далее, учитывая выражение (9.4), находим  $p_0^{TP} = [0,65/0,9]^{1/2} = 0,85$ .

Это означает, что средства на повышение надежности необходимо распределить следующим образом: надежность подсистемы №1 увеличивают с 0,7 до 0,85; надежность подсистемы №2 - с 0,8 до 0,85; надежность подсистемы №3 оставляют на прежнем уровне. В результате вероятность безотказной работы всей системы:

$$P = (0,85)^2 \cdot 0,90 = 0,65.$$

### 9.3. Показатели надежности системы, состоящей из независимых элементов

Всякая система характеризуется безотказностью и ремонтпригодностью. В качестве основной характеристики безотказности системы служит функция надежности, которая представляет собой вероятность безотказной работы в течение некоторого времени  $t$ .

Пусть система состоит из  $n$  элементов, функции надежности которых обозначим через  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ , ...,  $p_n(t)$ . Так как элементы, входящие в состав системы, являются независимыми, то вероятность безотказной работы системы определяется как произведение вероятностей составляющих ее элементов

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)...p_n(t). \quad (9.6)$$

В частном случае, когда функции надежности составляющих элементов имеют экспоненциальное распределение с постоянными интенсивностями отказов, функция надежности системы определяется по формуле

$$P(t) = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t] = \exp[-\sum_{i=1}^n \lambda_i t] \quad (9.7)$$

Одной из важнейших характеристик безотказности системы является среднее время жизни, которое вычисляют, используя выражение

$$Tc = - \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (9.8)$$

Для случая экспоненциального распределения среднее время жизни системы равно

$$Tc = \int_0^{\infty} \exp[-\sum_{i=1}^n \lambda_i t] dt = 1/(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) \quad (9.9.)$$

$$0 \quad i = 1$$

Среднее время жизни системы или наработку на отказ по результатам статистических данных вычисляют по формуле

$$T_c = T/m, \quad (9.10)$$

где  $T$  — суммарная наработка системы, полученная по результатам испытаний или эксплуатации;  $m$  — суммарное число отказов, зафиксированное в процессе испытаний или эксплуатации.

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность системы, необходимость применения которой возникает в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение системы по назначению не предусматривается), начиная с которого система будет работать безотказно в течение заданного времени  $t$ . Значение коэффициента оперативной готовности определяют из выражения

$$K_o = K_g P(t) = P(t) T_c / (T_c + T_v). \quad (9.11)$$

**Пример 9.2.** Определить коэффициент оперативной готовности системы за период времени  $t = 10$  ч, если известно, что система состоит из пяти элементов с соответствующими интенсивностями отказов, ч<sup>-1</sup>:  $\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ ;  $\lambda_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ ;  $\lambda_3 = 10^{-5}$ ;  $\lambda_4 = 20 \cdot 10^{-5}$ ;  $\lambda_5 = 50 \cdot 10^{-5}$ , а среднее время восстановления при отказе одного элемента равно  $T_v = 10$  ч. Результатами испытаний установлено, что распределение наработки на отказ подчиняется экспоненциальному закону.

**Решение.** Вероятность безотказной работы определим по формуле (9.6):

$$P(t) = \exp[-\sum \lambda_i t] \approx 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) 10^{-5} t = \\ = 1 - (2 + 5 + 1 + 20 + 50) 10^{-5} \cdot 10 = 0,992.$$

Значение  $T_c$  определяем по формуле (6.37)

$$T_c = 1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) = 105/78 = 1282 \text{ ч.}$$

Используя формулу (9.10), вычислим коэффициент оперативной готовности

$$K_o = P(t) T_c / (T_c + T_v) = 0,992 \cdot 1282 / (1282 + 10) = 0,984.$$

Ответ:  $K_o = 0,984$ .

**Пример 9.3.** При эксплуатации в течении одного года ( $T_{\Sigma} = 1 \text{ год} = 8760$  ч.) изделий специального назначения было зафиксировано пять отказов ( $m = 5$ ). На восстановление каждого отказа в среднем затрачено двадцать часов ( $T_v = 20$  ч.). За указанный период эксплуатации был проведен один регламент (техническое обслуживание). Время регламента составило десять суток ( $T_p =$

240 ч.). Определить коэффициенты: готовности ( $K_{Г}$ ) и технического использования ( $K_{И}$ ).

**Решение.** Коэффициент готовности определим по формуле

$$K_{Г} = 1 - (m T_{В}/T_{Э}) = 1 - (5.20/8760) = 0,9886.$$

Коэффициент технического использования равен:

$$K_{И} = 1 - (m T_{В} + T_{р})/T_{Э} = 1 - (5.20 + 240)/8760 = 0,9612.$$

Ответ:  $K_{Г} = 0,9886$ ;  $K_{И} = 0,9612$ .

#### Литература

1. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.– Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. -154 с.: ил., 24 библиогр.

2.Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М., Пучков В.А., Томаков В.И., Фалеев М. И. Надёжность технических систем и техногенный риск.- М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368с.

3. Надёжность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.

4. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.

5. Чулков Н.А. Надёжность технических систем и техногенный риск: учебное пособие/Н.А. Чулков, А.Н.Деренок: Томский политехнический университет.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.- 150 с.

## Лекция 10

### Расчет показателей надежности технических систем

#### 10.1. Структурные модели надежности сложных систем

Большинство технических систем являются сложными системами, состоящими из отдельных узлов, деталей, агрегатов, систем управления и т.п. Под **сложной системой** понимается объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы (компоненты), каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы.

С позиций надежности сложная система обладает как отрицательными, так и положительными свойствами.

Факторы, отрицательно влияющие на надежность сложных систем:

- большое число элементов, отказ каждого из которых может привести к отказу всей системы;

- сложность оценки работоспособности сложных систем с точки зрения статистических данных в связи с их уникальностью и небольшим количеством;

- в связи с наличием у систем даже одинакового предназначения своих незначительных вариаций свойств отдельных элементов, которые сказываются на выходных параметрах системы. Чем сложнее система, тем большими индивидуальными особенностями она обладает.

Однако сложные системы обладают и такими свойствами, которые положительно влияют на их надежность:

- сложным системам свойственна самоорганизация, саморегулирование или самоприспособление, когда система способна найти наиболее устойчивое для своего функционирования состояние;

- для сложной системы часто возможно восстановление работоспособности по частям, без прекращения ее функционирования;

- не все элементы системы одинаково влияют на надежность сложной системы.

Анализ работоспособности сложной системы связан с изучением ее структуры и тех взаимосвязей, которые определяют ее надежное функционирование.

При анализе надежности сложные системы разбивают на элементы (компоненты) для того, чтобы вначале рассмотреть параметры и характеристики элементов, а затем оценить работоспособность всей системы. Под элементом можно понимать составную часть сложной системы, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами. При исследовании надежности системы элемент не расчленяется на составные части, и показатели безотказности и долговечности относятся к элементу в целом. При этом возможно восстановление работоспособности элемента независимо от других частей и элементов системы.

Анализ надежности сложных систем имеет свои специфические особенности. Влияние различных отказов и снижение работоспособности элементов системы могут по-разному сказаться на надежности всей системы.

При анализе надежности сложной системы все ее элементы и компоненты целесообразно разделить на следующие группы.

- элементы, отказ которых практически не влияет на работоспособность системы (деформация ограждающего кожуха машины, изменение окраски



поверхности и т.п.). Отказы (т.е. неисправное состояние) этих элементов могут рассматриваться изолированно от системы.

- элементы, работоспособность которых за рассматриваемый период времени практически не изменяется (станины и корпусные детали, малонагруженные элементы с большим запасом прочности).

- элементы, ремонт или регулировка которых возможна при работе изделия или во время остановок, не влияющих на его эффективность (подналадка и замена режущего инструмента на станке и т.д)

- элементы, отказ которых приводит к отказам системы.

Таким образом, рассмотрению и **анализу надежности подлежат лишь элементы последней группы.** Имеется ограниченное число элементов, которые в целом определяют надежность системы. Эти элементы и подсистемы выявляются при рассмотрении структурной схемы параметрической надежности.

*Модели надежности* устанавливают связь между подсистемами (или элементами системы) и их влиянием на работу всей системы. **Структурная схема надежности** определяет функциональную взаимосвязь между работой подсистем (или элементов) в определенной последовательности. Эту схему составляют по принципу функционального назначения соответствующих подсистем (или элементов) при выполнении ими определенной части работы, выполняемой системой в целом. Техническая система может быть сконструирована таким образом, что для успешного ее функционирования необходима исправная работа всех ее элементов. В этом случае ее называют **последовательной системой.** Системы, в которых при отказе одного элемента другой элемент способен выполнить его функции, называют **параллельной.** Системы обладающие свойствами как параллельных, так и последовательных систем называются **системами со смешанным соединением.**

**При расчете надежности необходимо исследовать действия системы, основываясь на ее функциональной структуре и используя вероятностные соотношения.**

Такое исследование структуры позволяет выявить узкие места в конструкции системы с точки зрения ее надежности, а на этапе проектирования разработать конструктивные меры по устранению подобных узких мест. Например:

- можно заранее подсчитать, сколько резервных элементов необходимо для обеспечения заданного уровня надежности системы;

- можно рассчитать надежность системы, построенной из элементов с известной надежностью, или наоборот, исходя из требования к надежности системы, предъявить требования к надежности элементов.

## 10.2. Структурная схема надежности системы с последовательным соединением элементов

Схемы, в которых отказ одного элемента вызывает отказ другого элемента, а затем третьего и т.д. (рис. 10.1). Большинство приводов машин и механизмы передач подчиняются этому условию. Так, если в приводе машины выйдет из строя любая шестерня, подшипник, муфта, рычаг управления, электродвигатель, насос смазки, то весь привод перестанет функционировать. При этом отдельные элементы в этом приводе не обязательно должны быть соединены последовательно.

Такую структурную схему называют *схемой с последовательным соединением зависимых элементов*. В этом случае надежность системы определяют по теореме умножения для *зависимых событий*.

Рассмотрим систему, состоящую из двух или более элементов, при исправной работе всех ее элементов. Предположим, что событие  $A$  имеет место тогда и только тогда, когда имеют место все события  $A_i$ , т.е. система исправна тогда и только тогда, когда исправны все ее элементы. В этом случае систему называют *последовательной системой*.

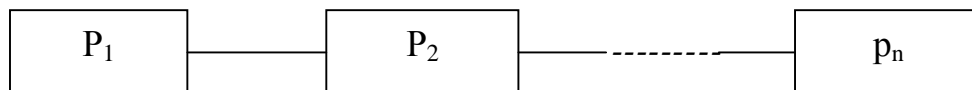


Рис.10.1. Структурная схема надежности системы с последовательным соединением элементов.

Известно, что отказ любого элемента такой системы приводят, как правило, к отказу системы. Поэтому **вероятность безотказной работы системы определяют как произведение вероятностей для независимых событий**.

Таким образом, надежность всей системы равна произведению надежностей подсистем или элементов:

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (10.1)$$

$i=1$

Обозначив  $P(A) = P$ ;  $P(A_i) = p_i$ , получим

$n$

$$P = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (10.2)$$

$i=1$

где  $P$  — надежность.

Сложные системы, состоящие из элементов высокой надежности, могут обладать низкой надежностью за счет наличия большого числа элементов. Например, если узел состоит всего из 50 деталей, а вероятность безотказной работы каждой детали за выбранный промежуток времени составляет  $P_i = 0,99$ , то вероятность безотказной работы узла будет  $P(t) = (0,99)^{50} = 0,55$ .

Если же узел с аналогичной безотказностью элементов состоит из 400 деталей, то  $P(t) = (0,99)^{400} = 0,018$ , т.е. узел становится практически неработоспособным.

**Пример 10.1.** Определить надежность транспортной системы при движении на заданное расстояние, если известны надежности следующих подсистем:

- системы зажигания  $p_1 = 0,99$ ;
- системы питания топливом и смазкой  $p_2 = 0,999$ ;
- системы охлаждения  $p_3 = 0,998$ ;
- двигателя  $p_4 = 0,985$ ;
- ходовой части  $p_5 = 0,997$ .

**Решение.** Известно, что отказ любой подсистемы приводит к отказу транспортной системы. Для определения надежности используем формулу (10.2)

$$P = p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 = 0,99 \cdot 0,999 \cdot 0,998 \cdot 0,985 \cdot 0,997 = 0,979.$$

Ответ:  $P = 0,979$ .

### 10.3. Структурные схемы надежности систем с параллельным соединением элементов

В практике проектирования сложных технических систем часто используют схемы с *параллельным соединением элементов* (рис. 10.2.), которые построены таким образом, что отказ системы возможен лишь в случае, когда отказывают все ее элементы, т.е. система исправна, если исправен хотя бы один ее элемент. Такое соединение часто называют *резервированием*. В большинстве случаев резервирование оправдывает себя, несмотря на увеличение стоимости. Наиболее выгодным *является резервирование отдельных элементов*, которые непосредственно влияют на выполнение основной работы. При конструировании технических систем в зависимости от выполняемой системой задачи применяют **горячее** или **холодное резервирование**.

**Горячее резервирование** применяют тогда, когда не допускается перерыв в работе на переключение отказавшего элемента на резервный с целью выполнения задачи в установленное время. Чаще всего горячему резервированию подвергают отдельные элементы. Используют горячее резервирование элементов и подсистем, например источников питания (аккумуляторные батареи дублируются генератором и т.п.).

**Холодное резервирование** используют в тех случаях, когда необходимо увеличение ресурса работы элемента, и поэтому предусматривают время на переключение отказавшего элемента на резервный.

Существуют технические системы с **частично параллельным резервированием**, т. е. системы, которые оказываются работоспособными даже в случае отказа нескольких элементов.

Рассмотрим систему, имеющую ряд параллельных элементов с надежностью  $p(t)$  и соответственно ненадежностью  $q(t) = 1 - p(t)$ . В случае, если система содержит  $n$  элементов, которые соединены параллельно, вероятность отказа системы равна

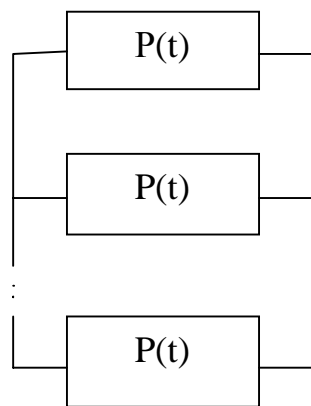


Рис. 10.2. Структурная схема надежности системы с параллельным соединением элементов

$$Q = [q(t)]^n, \quad (10.3)$$

а вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - [q(t)]^n, \quad (10.4)$$

При частично параллельном резервировании вероятность безотказной работы системы, состоящей из общего числа элементов  $n$ , определяют по формуле:

$$P(t) = \sum_{k=j}^n C_n^k p^k(t) q^{n-k}(t), \quad (10.5)$$

$k=j$

где  $p(t)$  — вероятность безотказной работы одного элемента;

$j$  — число исправных элементов, при котором обеспечивается работоспособность системы;

$C_n^k = n!/[k!(n - k)!]$  - число сочетаний из  $n$  элементов по  $k$ .

В случае  $j = 1$  система будет полностью параллельной, в остальных случаях – частично параллельной.

#### 10.4. Структурные схемы надежности систем с другими видами соединения элементов

Следует отметить, что в практике проектирования технических систем часто используют структурные схемы надежности с *параллельно-последовательным соединением* элементов. Так, например, часто при проектировании систем с радиоэлектронными элементами применяют схемы, работающие по принципу два из трех, когда работоспособность обеспечивается благодаря исправному состоянию любых двух элементов. Надежность такой схемы соединения определяют по формуле

$$p(t) = p^3(t) + 3p^2(t)q(t). \quad (10.6)$$

где  $p(t)$  — надежность каждого элемента за время работы  $t$  одинакова;  $q(t) = 1 - p(t)$ .

Широкое применение в проектировании нашли так называемые *мостиковые схемы*.

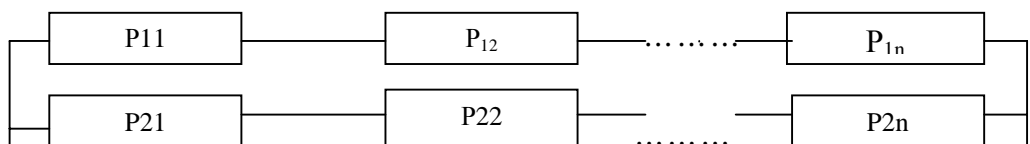
Надежность такой схемы определяют из соотношения вида

$$P(t) = p^5(t) + 5p^4(t)q(t) + 8p^3(t)q^2(t) + 2p^2(t)q^3(t). \quad (10.7)$$

Здесь все элементы также имеют одинаковую надежность.

Различают структурные схемы надежности с поканальным и поэлементным резервированием.

Структурная схема надежности с поканальным резервированием показана на рис. 10.3.



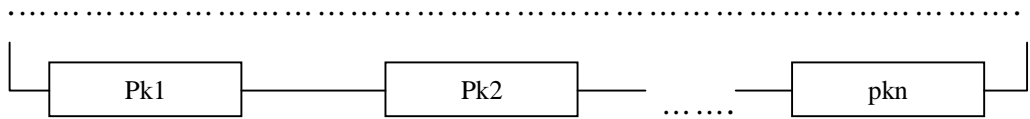


Рис. 10.3. Структурная схема надежности с поканальным резервированием

Формула надежности выглядит так:

$$P = [1 - (1 - p_{11} p_{12} \dots p_{1n}) (1 - p_{21} p_{22} \dots p_{2n}) (1 - p_{k1} p_{k2} \dots p_{kn})] \quad (10.8)$$

При  $p_{ij} = p_j$

$$P = 1 - (1 - p^1 p^2 \dots p^n)^k \quad (10.9)$$

Если  $p_{ij} = p$ , то

$$P = 1 - (1 - pn)^k \quad (10.10)$$

В практике проектирования часто используют структурную схему надежности с поэлементным резервированием (рис. 10.4).

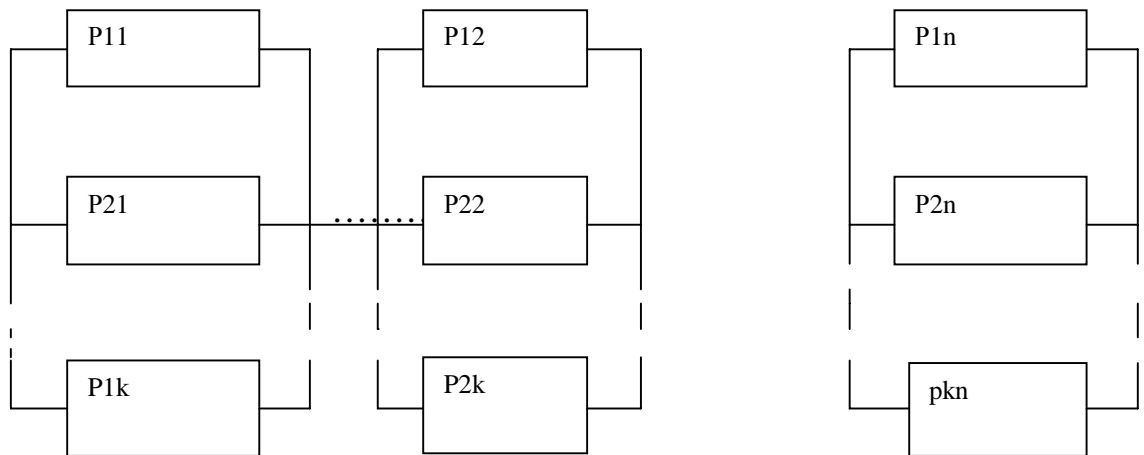


Рис.10.4. Структурная схема надежности с поэлементным резервированием

Надежность такой системы определяют по формуле:

$$P = [1 - (1 - p_{11})(1 - p_{21}) \dots (1 - p_{1k})][1 - (1 - p_{12})(1 - p_{22}) \dots (1 - p_{2k})] \dots [1 - (1 - p_{1n})(1 - p_{2n}) \dots (1 - p_{kn})]. \quad (10.11)$$

При  $p_{ij} = p_j$

$$P = [1 - (1 - p^1)^{k1}][1 - (1 - p^2)^{k2}] \dots [1 - (1 - p^n)^{kn}]. \quad (10.12)$$

Если  $p_{ij} = p$ , то

$$P = [1 - (1 - p)^k]^n. \quad (10.13)$$

Структурная схема с поэлементным резервированием имеет более высокую надежность по сравнению с поканальным резервированием.

**Пример 10.2.** Техническая система предназначена для выполнения некоторой задачи. С целью обеспечения работоспособности система спроектирована со смешанным соединением элементов (рис. 10.5).

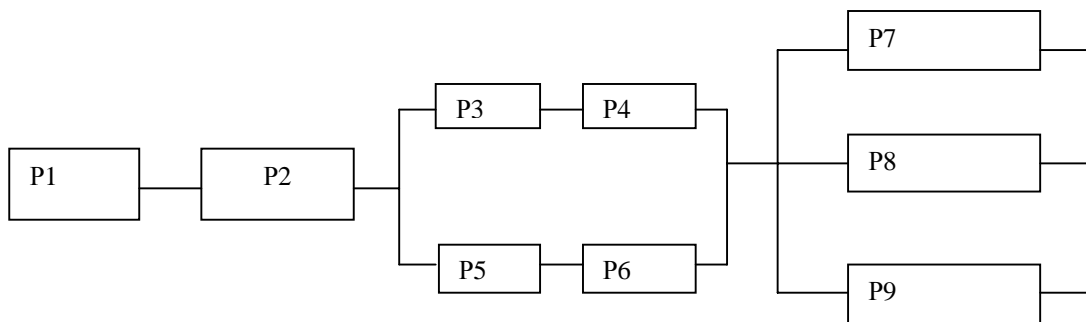


Рис. 9.5. Структурная схема надежности со смешанным соединением элементов

Определить надежность системы, если известно, что надежность ее элементов равна:

$$p_1=0,99; p_2=0,98; p_3=0,9; p_4=0,95; p_5=0,9; p_6=0,9; p_7=0,8; p_8=0,75; p_9=0,7.$$

**Решение.** При расчете надежности воспользуемся формулами как для последовательного, так и для параллельного соединения элементов:

$$P = p_1 p_2 [1 - (1 - p_3 p_4)(1 - p_5 p_6)] [1 - (1 - p_7)(1 - p_8)(1 - p_9)] = 0,99 \cdot 0,98 [1 - (1 - 0,9 \cdot 0,95)(1 - 0,9 \cdot 0,9)] [1 - (1 - 0,8)(1 - 0,75)(1 - 0,7)] = 0,927.$$

Структурная схема, в которой элементы, отказ которых приводит к отказу всей системы, изображаются последовательно, а резервные элементы или цепи – параллельно.

Разницу между конструктивной (монтажной) схемой и структурной схемой надёжности системы можно показать на примере работы двух фильтров гидросистемы, которые для повышения надежности работы могут быть установлены последовательно или параллельно (рис.10.6).

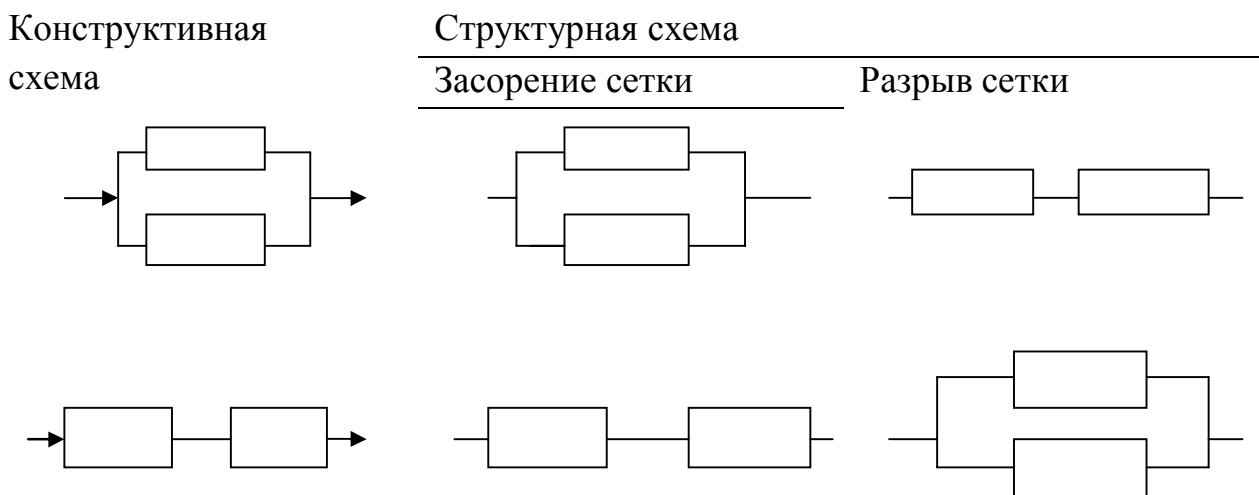


Рис.10.6. Конструктивные и структурные схемы надежности соединения фильтров при различных видах отказов

Отказ фильтра может произойти в результате двух основных причин – засорения сетки и ее разрыва.

В случае засорения сетки структурная схема надежности соответствует конструктивной. Последовательное соединение фильтров в этом случае только снизит надежность системы, так как отказ любого из фильтров приведет к отказу системы, поскольку необходимый поток жидкости не будет проходить сквозь фильтр.

### Литература

21. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.
22. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
23. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.
24. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.
25. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.

## Лекция 11

### Оценка безопасности технических систем

#### 11.1. Критерии безопасности ТС

Основным базовым показателем надёжности и безопасности технических систем может служить **вероятность безотказной работы  $P(t)$**  – вероятность того, что в заданном интервале времени  $t = T$  не возникнет отказа этого объекта.

Значение  $P(t)$  может находиться в пределах  $0 \leq P(t) \leq 1$ . Вероятность безотказной работы  $P(t)$  и вероятность отказа  $R(t)$  образуют полную группу событий, поэтому

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



Допустимое значение  $P(t)$  выбирается в зависимости от степени опасности отказа объекта. Например, для ответственных изделий авиационной техники допустимые значения  $P(t) = 0,9999$  и выше, т.е. практически равны единице.

При высоких требованиях к надёжности объекта задаются допустимым значением  $P(t) = \gamma\%$  ( $\gamma\%$  – вероятность безотказной работы объекта в %) и определяют время работы объекта  $t = T\gamma$ , соответствующее данной регламентированной вероятности безотказной работы. **Значение  $T\gamma$  называется гамма-процентным ресурсом** и по его значению судят о большей или меньшей безотказности и безопасности объектов.

Пусть  $R(t)$  – вероятность возникновения аварийной ситуации на отрезке времени  $[0, t]$ . Эта вероятность должна удовлетворять условию

$$R(t_*) \leq R^* ,$$

где  $R^*$  – предельно допустимое (нормативное) значение риска возникновения аварийной ситуации. Используем нормативное значение вероятности безотказной, т.е. безопасной, работы  $P^*$ , которая весьма близка к единице (например,  $R^* = 1$ ).

Функция риска на отрезке времени  $[0, t]$  дополняет функцию безопасности  $P(t)$  до единицы:

$$R(t) = 1 - P(t) .$$

Интенсивность риска аварийной ситуации (удельный риск) аналогична интенсивности отказов:

$$r(t) = - P'(t) / P(t) = R'(t) / [1 - R(t)] .$$

Поскольку уровень безопасности должен быть высоким, то можно принять

$$1 - R(t) = P(t) \gg 1 .$$

Тогда интенсивность риска аварийной ситуации будет

$$r(t) \gg R'(t) = - P'(t) .$$

Поскольку время  $t$  при оценке риска аварии исчисляются в годах, то  $r(t)$  имеет смысл годового риска возникновения аварийной ситуации.

Средний годовой риск аварии:

$$r_{cp}(t) = R(t) / T .$$

Пусть, например,  $r_{cp} = \text{const} = 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ;  $T = 50 \text{ лет}$ . Тогда

$$R(T) = r(t)T = 10^{-5} * 50 = 5 * 10^{-4};$$

$$P(T) = 1 - R(T) = 1 - 5 * 10^{-4} = 0,9995.$$

Для одинаковых технических объектов функция безопасности

$$P_n(t) = P^n(t)$$

где  $n$  – численность парка одинаковых объектов. В этом случае функция риска

$$R_n(t) = 1 - [1 - R(t)]^n \approx nR(t),$$

при условии  $n R(t) \ll 1$ .

Аналогично для удельного риска:

$$r_n(t) \approx n r(t) \text{ и } r_{ncp} \approx n r_{cp}(t).$$

Инженерные расчёты инженерных конструкций на безопасность основаны на концепции коэффициентов запаса. В этом случае расчётное условие имеет вид

$$F \leq S / m,$$

где  $F$  – параметр воздействия;  $S$  – параметр сопротивления;  $m$  – коэффициент безопасности ( $m > 1$ ).

## 11.2. Показатели безопасности систем «человек – машина» (СЧМ)

Надёжность характеризует безошибочность (правильность) решения стоящих перед СЧМ задач. Оценивается вероятностью правильного решения задач, которая, по статистическим данным, определяется соотношением

$$P_{np} = 1 - m_{om} / N,$$

где  $m_{от}$  и  $N$  – соответственно число ошибочно решённых и общее число решаемых задач.

Точность работы оператора – степень отклонения некоторого параметра, измеряемого, устанавливаемого или регулируемого оператором, от своего истинного, заданного или номинального значения. Количественно точность работы оператора оценивается величиной погрешности, с которой оператор измеряет, устанавливает или регулирует данный параметр:

$$Y = I_n - I_{оп},$$

где  $I_n$  – истинное или номинальное значения параметра;  $I_{оп}$  – фактически измеряемое или регулируемое оператором значение этого параметра.

Не всякая погрешность является ошибкой до тех пор, пока величина погрешности не выходит за допустимые пределы.

В работе оператора следует различать **случайную и систематическую погрешности**.

**Случайная погрешность** оператора оценивается величиной среднеквадратической погрешности, **систематическая погрешность** – величиной математического ожидания отдельных погрешностей.

Своевременность решения задачи СЧМ оценивается вероятностью того, что стоящая перед СЧМ задача будет решена

$$P_{св} = P\{T_n \leq T_{доп}\} =$$

где  $P(T)$  – функция плотности времени решения задачи системой «человек–машина». Эта вероятность по статистическим данным за время, не превышающее допустимое:

$$P_{св} = 1 - m_{нс} / N,$$

где  $m_{нс}$  – число несвоевременно решённых СЧМ задач.

В качестве общего показателя надёжности используется вероятность правильного ( $P_{пр}$ ) и своевременного ( $P_{св}$ ) решения.

$$P_{счм} = P_{пр} * P_{св};$$

$$P_{от} = 1 - \sum_{i=1}^n P_{воз.i} * P_{от.i},$$

где  $P_{\text{воз.}i}$  – вероятность возникновения опасной или вредной для человека производственной ситуации  $i$ -го типа;  $P_{\text{от.}i}$  – вероятность неправильных действий оператора в  $i$ -й ситуации.

Степень автоматизации СЧМ характеризует относительное количеством информации, перерабатываемой автоматическими устройствами:

$$Ka = 1 - H_{\text{оп}} / H_{\text{счм}},$$

где  $H_{\text{оп}}$  – количество информации, перерабатываемой оператором;

$H_{\text{счм}}$  – общее количество информации, циркулирующей в системе «человек–машина».

Экономический показатель  $W_{\text{счм}}$  характеризует полные затраты на систему «человек–машина». В общем случае эти затраты складываются из затрат на создание (изготовление) системы  $C_{\text{и}}$ , затрат на подготовку операторов  $C_{\text{оп}}$  и эксплуатационных расходов  $C_{\text{э}}$  :

$$W_{\text{счм}} = E_{\text{н}} (C_{\text{и}} + C_{\text{оп}}) + C_{\text{э}},$$

где  $E_{\text{н}}$  – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных затрат ( $C_{\text{и}} + C_{\text{оп}}$ ).

**Эргономические показатели** учитывают совокупность специфических свойств СЧМ и представляют иерархическую структуру, включающую в себя ценностную эргономическую характеристику (эргономичность СЧМ), комплексные (управляемость, обслуживаемость, освояемость и обитаемость СЧМ), групповые (социально-психологические, психологические, физиологические, антропометрические, гигиенические) единичные показатели.

**Надёжность оператора** – свойство качественно выполнять трудовую деятельность в течение определённого времени при заданных условиях. Ошибками оператора являются: невыполнение требуемого или выполнение лишнего (несанкционированного) действия, нарушение последовательности выполнения действий, неправильное или несвоевременное выполнение требуемого действия.

В зависимости от последствий ошибки могут быть аварийными и неаварийными.

Надёжность оператора характеризуется показателями безошибочности, готовности, восстанавливаемости и своевременности.

Показателем безошибочности является вероятность безошибочной работы. Для типовых, часто повторяющихся операций в качестве показателя безошибочности может использоваться интенсивность ошибок:

$$P_j = (N_j - n_j) / N_j, \quad \lambda_j = n_j / N_j * T_j,$$

где  $P_j$  – вероятность безошибочного выполнения операций  $j$ -го типа;

$\lambda_j$  – интенсивность ошибок  $j$ -го вида;

$N_j, n_j$  – общее число выполненных операций  $j$ -го вида и допущенное при этом число ошибок;  $T_j$  – среднее время выполнения операций  $j$ -го вида.

Для участка устойчивой работоспособности оператора можно найти вероятность безошибочного выполнения операций:

$$P_{оп} = \prod_{j=1}^r (1 - P_j)^{k_j} = \exp \left( - \sum_{j=1}^r k_j P_j \right) \equiv \exp \left[ - \sum_{j=1}^r \lambda_j T_j k_j \right]$$

где  $k_j$  – число выполненных операций  $j$ -го вида;  $r$  – число различных типов операций ( $j = 1, 2, \dots, r$ ).

Коэффициент готовности оператора представляет собой вероятность включения оператора в работу в любой произвольный момент времени:

$$k_{он} = 1 - T_0 / T,$$

где  $T_0$  – время, в течение которого оператор по тем или иным причинам не находится на рабочем месте;

$T$  – общее время работы оператора.

**Показатель восстанавливаемости** – возможность самоконтроля оператором своих действий и исправления допущенных ошибок, т.е. представляет вероятность исправления оператором допущенной ошибки:

$$P_{исп} = P_k P_{об} P_{и},$$

где  $P_k$  – вероятность выдачи сигнала системой контроля;

$P_{об}$  – вероятность обнаружения оператором сигнала контроля;  $P_{и}$  – вероятность исправления ошибочных действий при повторном выполнении операций.

Основным показателем своевременности является вероятность выполнения задачи в течение времени  $\tau < t_l$

$$P_{св} = P \{ \tau < t_l \} = \int_0^{t_l} f(\tau) d\tau,$$

где  $f(t)$  – функция распределения времени решения задачи оператором.

**Надёжность деятельности оператора** не остаётся величиной постоянной, а меняется с течением времени. Это обусловлено как изменением условий деятельности, так и колебаниями состояния оператора.

**Среднее значение вероятности безошибочной работы оператора**

$$P_{\text{оп}} = \sum_{i=1}^m P_i + \frac{P_{\text{оп}}}{i},$$

где  $P_i$  – вероятность наступления  $i$ -го состояния СЧМ;

$P_{\text{оп}}/i$  – условная вероятность безошибочной работы оператора в  $i$ -м состоянии;

$m$  – число рассматриваемых состояний СЧМ.

Для систем непрерывного типа показателем надёжности является вероятность безотказного, безошибочного и своевременного протекания производственного процесса в течение времени  $t$

$$P_{\text{ч.м1}}(t) = P_{\text{т}}(t) + [1 - P_{\text{т}}(t)] K_{\text{оп}} [P_{\text{оп}} P_{\text{св}} + (1 - P_{\text{оп}}) P_{\text{исп}}(t)],$$

где  $P_{\text{т}}(t)$  – вероятность безотказной работы технических средств;

$K_{\text{оп}}$  – коэффициент готовности оператора;

$P_{\text{св}}$  – вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий;

$P_{\text{исп}}$  – вероятность исправления ошибочных действий.

Для СЧМ дискретного типа:

$$P_{\text{ч.м2}} = K_{\text{г}} P_{\text{т}} P_{\text{оп}} P_{\text{св}} + (1 - P_{\text{т}} K_{\text{г}}) P_{\text{вос}} P_{\text{оп}} P_{\text{св}} + (1 - P_{\text{оп}}) P_{\text{т}} P_{\text{исп}},$$

где  $K_{\text{г}}$  – коэффициент готовности техники;

$P_{\text{вос}}$  – вероятность восстановления отказавшей техники.

Вероятность  $P_{\text{ч.м1}}$  используется в случаях, если:

- 1) технические средства работают исправно;
- 2) произошёл отказ технических средств, но при этом:
  - а) оператор безошибочно и своевременно выполнил требуемые действия по ликвидации аварийной обстановки;
  - б) оператор допустил ошибочные действия, но своевременно их исправил.

Показатель надёжности  $P_{\text{ч.м2}}$  используется, если:

- 1) в требуемый момент времени техника находится в исправном состоянии, не отказала в течение времени выполнения задачи, действия оператора были безошибочными и своевременными;
- 2) неготовая или отказавшая техника была своевременно восстановлена, операторы при решении задачи не допускали ошибок;
- 3) при безотказной работе техники оператор допустил ошибку, но своевременно исправил её.

## Литература

26. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.
27. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
28. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.
29. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.
30. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.

## Лекция 12

### Логико-графические методы анализа надёжности и риска

#### 12.1. Понятия дерева отказов: определения и символы

Анализ причин промышленных аварий показывает, что возникновение и развитие крупных аварий, как правило, характеризуется комбинацией случайных локальных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях аварии (отказы оборудования, человеческие ошибки при эксплуатации/ проектировании, внешние воздействия, разрушение /разгерметизация, выброс/ утечка, пролив вещества, испарение, рассеяние веществ, воспламенение, взрыв, интоксикация и т.д.). Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы деревьев отказов и событий.

Широкое распространение получили диаграммы в форме *поточковых графов* (графов состояний и переходов), *деревьев событий, отказов* (целей, свойств) и *функциональных сетей* различного предназначения и структуры.

Наиболее широко используемым типом диаграмм влияния являются «деревья». В безопасности диаграммы данного класса часто называют «деревом происшествий» и «деревом их исходов». Они являются в

сущности графами с ветвящейся структурой и с дополнительными (логическими) условиями.

Основные достоинства этих моделей:

- сравнительная простота построения;
- дедуктивный характер выявления причинно-следственных связей исследуемых явлений;
- направленность их на существенные факторы;
- легкость преобразования таких моделей;
- наглядность реакции изучаемой системы на изменение структуры;
- возможность качественного анализа исследуемых процессов;
- легкость дальнейшей формализации и алгоритмизации;
- приспособленность к обработке на средствах ВТ (вычислительная техника);
- доступность для статистического моделирования и количественной оценки изучаемых явлений, процессов и их свойств.

Создание «дерева» заключается в определении структуры происшествия:

- элементов – головного события (происшествия) и ему предшествующих предпосылок;
- связей между ними – логических условий, соблюдение которых необходимо и достаточно для его возникновения.

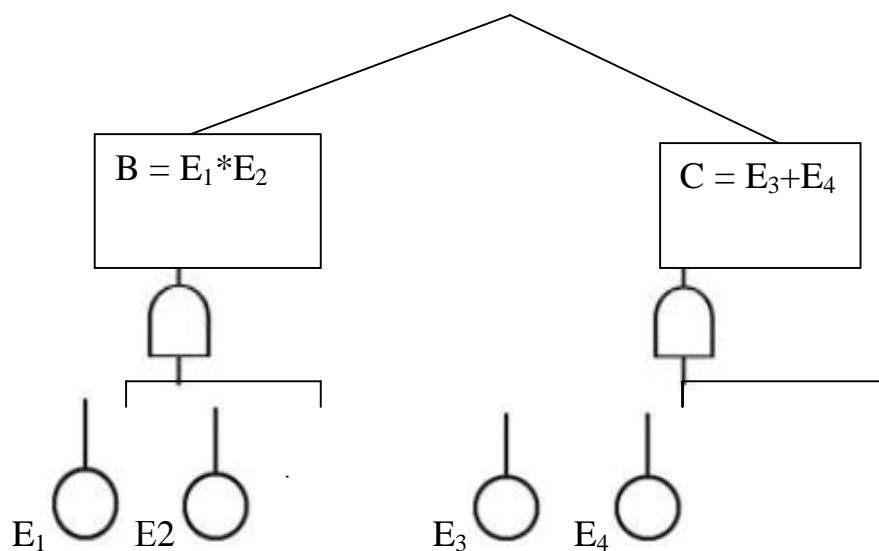
На практике обычно используют **обратную** или **прямую последовательность** выявления условий возникновения конкретных происшествий или аварийности и травматизма в целом:

- а) от головного события **дедуктивно** к отдельным предпосылкам;
- б) от отдельных предпосылок **индуктивно** к головному событию.

Из анализа структуры диаграммы влияния (рис. 12.1) следует, что основными ее компонентами служат **узлы** (вершины) и **связи** (отношения) между ними. **В качестве узлов** обычно подразумеваются простейшие элементы моделируемых категорий (переменные или константы) – события, состояния, свойства, а **в качестве связей** – активности, работы, ресурсы и другие взаимодействия. Отношения или связи между переменными или константами в узлах диаграммы графически представляются в виде линий, называемых дугами или ребрами.

$$D = E_1 * E_2 (E_3 + E_4)$$





**Рис. 12. 1. Дерево отказов**

Каждые два соединенных между собой узла образуют **ветвь диаграммы**. В тех случаях, когда узлы связаны направленными дугами таким образом, что каждый из них является общей для двух ветвей, возникают **циклы** или **петли**.

**Переменные** в узлах характеризуются **фреймами** данных – множеством выходов (значений, принимаемых переменными, неизменных во времени и между собой не пересекающихся) и условными распределениями вероятностей появления каждого (переменного) из них.

Идея прогнозирования размеров ущерба от происшествий в человеко-машинных системах основана на использовании деревьев специального типа (**деревьев исходов**) – вероятностных графов. Их построение позволяет учитывать различные варианты разрушительного воздействия потоков энергии или вредного вещества, высвободившихся в результате происшествия.

**С помощью предварительно построенных диаграмм – графов, сетей, и деревьев могут быть получены математические модели аварийности и травматизма.**

В исследовании безопасности широкое распространение получили диаграммы влияния ветвящейся структуры, называемые «**деревом**» событий (отказов, происшествий).

**Деревом событий** называют не ориентированный граф, не имеющий циклов, являющийся конечным и связанным. В нем каждая пара вершин должна быть связанной (соединенной цепью), однако все соединения не должны образовывать петель (циклов), т.е. содержать такие маршруты,

вершины которых одновременно являются началом одних и концом других цепей.

*Дерево происшествий* обычно включает одно, размещаемое сверху нежелательное событие – происшествие (авария, несчастный случай, катастрофа), которое соединяется с набором соответствующих событий – предпосылок (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих определяющие их **цепи** или **«ветви»**. **«Листьями»** на ветвях дерева происшествий служат предпосылки – инициаторы причинных цепей, рассматриваемые как постулируемые исходные события, дальнейшая детализация которых не целесообразна. **В качестве узлов** дерева происшествий **могут использоваться** как отдельные события или состояния, так и логические условия их объединения (сложения или перемножения).

## 12.2. Анализ «Дерева отказов»

Опасности носят потенциальный, т.е. скрытый характер. Условия реализации потенциальной **опасности называются причинами**.

**Опасность** – следствие некоторой причины или группы причин, которая, в свою очередь, является следствием другой причины, т.е. причины и следствия образуют иерархические структуры или системы, так называемые:

- «дерево событий»;
- «дерево причин»;
- «дерево отказа» или «дерево опасности»;
- «дерево неисправностей».

Процедура построения дерева неисправностей (отказов) включает, как правило, следующие этапы:

1. Определение нежелательного (завершающего) события в рассматриваемой системе.
2. Тщательное изучение возможного поведения и предполагаемого режима использования системы.
3. Определение функциональных свойств событий более высокого уровня для выявления причин тех или иных неисправностей системы и проведение более глубокого анализа поведения системы с целью выявления логической взаимосвязи событий более низкого уровня, способных привести к отказу системы.
4. Построение дерева неисправностей (отказов) для логически связанных событий на входе. Эти события должны определяться в терминах идентифицируемых независимых первичных отказов.

Более строгий и систематический анализ предусматривает выполнение таких процедур, как (1) определение границ системы, (2) построение дерева неисправностей, (3) качественная оценка, (4) количественная оценка.

Обычно система изображается в виде блок-схемы, показывающей все функциональные взаимосвязи и элементы.

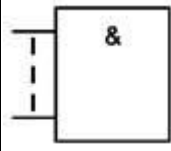

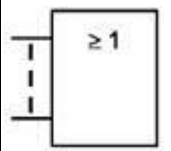

**При построении дерева неисправностей** исключительно важную роль приобретает правильное задание граничных условий, задание завершающего нежелательного события. Исследователь обязан составить перечень всех допущений, принимаемых при определении системы и построении дерева неисправностей.

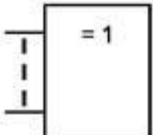

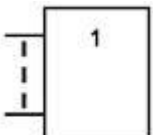
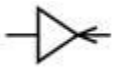

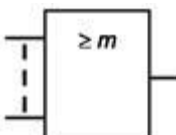
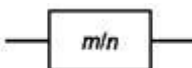
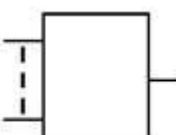

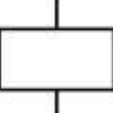
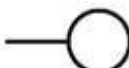


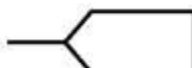



**Анализ дерева происшествий** связан с определением возможности появления или не появления головного события – происшествия конкретного типа. Данные условия устанавливаются путём выделения из всего массива исходных предпосылок двух подмножеств, реализация которых либо приводит, либо не приводит к возникновению головного события.

Такие подмножества делятся на *аварийные сочетания* предпосылок, образующие в совокупности с условиями их появления, каналы прохождения сигнала до этого события, и *отсечные сочетания*, исключающие условия формирования таких путей к головному событию. Самым удобным способом выявления условий возникновения и предупреждения происшествий является выделение из таких подмножеств так называемых «*минимальных сочетаний событий*», т.е. тех из них, появление которых минимально необходимо и достаточно для достижения желаемого результата.

### 12.3. Определения и символы, используемые при построении дерева

ГОСТ Р 51901.13-2005(МЭК 61025:1990). Анализ дерева отказов (неисправностей)

Предпочтительный символ	Допустимый символ	Функция	Описание
		Клапан И	Событие происходит, если все входные события происходят одновременно
		Клапан ИЛИ	Событие происходит, если происходит любое из входных событий (или одно, или в любой комбинации)

Предпочтительный символ	Допустимый символ	Функция	Описание
		Клапан «исключительное ИЛИ»	Событие происходит, если происходит одно из входных событий (используется обычно с двумя входными событиями)
		Клапан НЕ	Событие представляет собой состояние, которое является инверсией состояния, определенного входным событием (событие, противоположное входному событию)
	-	Клапан ЗАПРЕЩЕНИЯ	Событие происходит, если происходит входное событие, приложенное справа, в то время как событие, указанное внутри символа и формирующее условия, выполняется. Если условие вызвано появлением другого события, клапан ЗАПРЕЩЕНИЯ подразумевает синхронизацию событий
		Избыточная структура	Событие происходит, если происходит по крайней мере $m$ из $n$ входных событий
		Клапан (общая форма)	Общий символ клапана, функция которого указывается внутри символа
	-	Блок описания события	Название или описание события, код события и вероятности появления (при необходимости) должны быть указаны внутри символа
	-	Основное событие	Событие, которое не может быть подразделено на составляющие события
	-	Неразработанное событие	Событие, дальнейшая разработка которого не была проведена (обычно потому, что это предполагалось нецелесообразным)
	-	Анализируемое в другом месте событие	Событие, которое разработано в другом месте дерева неисправностей
	-	Дом	Событие, которое произошло или произойдет обязательно
	-	Нулевое событие	Событие, которое не может произойти
	-	«Переход в»	Событие, определенное в другом месте дерева неисправностей
	-	«Переход из»	Событие, переходящее из другого места дерева неисправностей

**Ключевые слова:** риск, надежность, вероятность отказа, система, элемент, отказ, дерево неисправностей, вершина событий

## 12.4. Построение «Дерева отказов»

**Дерево отказов (событий)** – это топологическая модель надёжности и безопасности, которая отражает логико-вероятностные взаимосвязи между отдельными случайными исходными событиями в виде первичных отказов или результирующих отказов, совокупность которых приводит к главному анализируемому событию. Таким образом, «дерево отказов» – это ориентировочный граф в виде дерева.

Основной целью построения дерева неисправностей является символическое представление существующих в системе условий, способных вызвать её отказ. Кроме того, построенное дерево позволяет показать в явном виде слабые места системы и является наглядным средством представления и обоснования принимаемых решений, а также средством исследования компромиссных соотношений или установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям.

Выделяют пять типов вершин «дерева отказов» (ДО):

- вершины, отображающие первичные отказы;
- вершины, отображающие результирующие или вторичные отказы;
- вершины, отображающие локальные отказы, которые не влияют на возникновение других отказов;
- вершины, соответствующие операции логического объединения случайных событий (типа «ИЛИ»);
- вершины, соответствующие операции логического произведения случайных событий (типа «И»).

Каждой вершине ДО, отображающей первичный или результирующий отказ, соответствует определенная вероятность возникновения отказа. Одним из основных преимуществ ДО является то, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов систем и событий, которые приводят к постулируемому отказу или аварии. Чтобы определить вероятность отказа, необходимо найти аварийные сочетания, для чего необходимо произвести качественный и количественный анализ «дерева отказов».

Структура «дерева отказа» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в узлах «деревьев» используются знаки «И» и «ИЛИ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при

одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

Обычно предполагается, что исследователь, прежде чем приступить к построению дерева неисправностей, тщательно изучает систему. Поэтому описание системы должно быть частью документации, составленной в ходе такого изучения.

В зависимости от конкретных целей анализа дерева неисправностей для построения последнего специалисты по надёжности обычно используют либо метод первичных отказов, либо метод вторичных отказов, либо метод инициированных отказов.

**Метод первичных отказов.** Отказ элемента называется *первичным*, если он происходит в расчётных условиях функционирования системы. Построение дерева неисправностей на основе учёта лишь первичных отказов не представляет большой сложности, так как дерево строится только до той точки, где идентифицируемые первичные отказы элементов вызывают отказ системы. Для иллюстрации этого метода рассмотрим следующий пример.

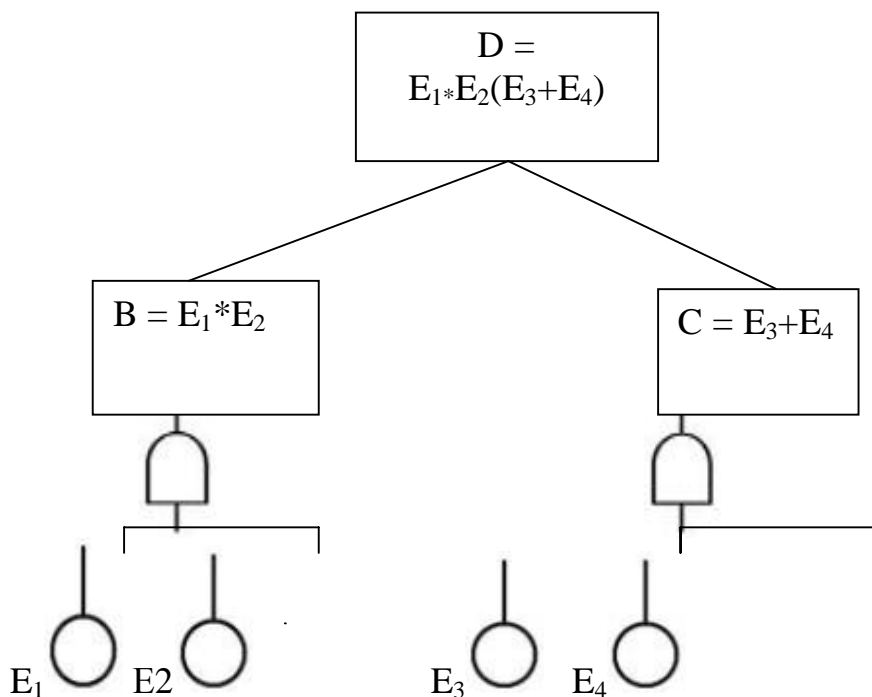
**Метод вторичных отказов.** Чтобы анализ охватывал и вторичные отказы, требуется более глубокое исследование системы. При этом анализ выходит за рамки рассмотрения системы на уровне отказов её основных элементов, поскольку вторичные отказы вызываются неблагоприятным воздействием окружающих условий или чрезмерными нагрузками на элементы системы процессе эксплуатации.

**Метод инициированных отказов.** Подобные отказы возникают при правильном использовании элемента, но в неустановленное время или в неполюженном месте. Инициированные отказы – это сбои операций координации событий на различных уровнях дерева неисправностей: от первичных отказов до завершающего события (нежелательного либо конечного).

## **12.5. Качественная и количественная оценка «дерева отказов»**

Излагаемый ниже подход основан на использовании так называемых минимальных сечений дерева неисправностей. Сечение определяется как множество элементарных событий, приводящих к нежелательному исходу. Если из множества событий, принадлежащих некоторому сечению, нельзя исключить ни одного и в то же время это

множество событий приводит к нежелательному исходу, то в этом случае говорят о наличии *минимального сечения*. Выявление минимальных сечений требует больших затрат времени, и для их нахождения требуется машинный алгоритм. Пример качественной оценки «дерева отказов» представлен на рис. 12.2.



**Рис. 12. 2. Дерево отказов**

Количественная оценка производится на основании информации о таких количественных показателях надёжности для завершающего события, как вероятность отказа, интенсивность отказов или интенсивность восстановлений. Вначале вычисляют показатели надёжности элемента, затем находят критический путь и, наконец, оценивают завершающее событие.

Количественная оценка дерева осуществляется либо методом статического моделирования, либо аналитическим методом. В первом случае дерево неисправностей моделируется на ЭВМ обычно для нескольких тысяч или даже миллионов циклов функционирования системы. При этом основными этапами моделирования являются:

- задание показателей надёжности для элементарных событий;
- представление всего дерева неисправностей на цифровой ЭВМ;
- составление перечня отказов, приводящих к завершающему событию, и перечня соответствующих минимальных сечений;
- вычисление требуемых конечных результатов.

Во втором случае используют существующие аналитические методы.

## 12.6. Аналитический вывод для простых схем «дерева отказов»

Для того чтобы дерево неисправностей отвечало своему назначению, в нём используются схемы, показывающие логические связи между отказами основных элементов системы и завершающим событием. Для представления этих логических схем в математической форме применяются основные законы булевой алгебры.

Схема «ИЛИ» изображается символом  $\dot{\cup}$  или  $+$ . Любой из этих символов показывает объединение событий, связанных со схемой «ИЛИ».

Математическое описание схем «ИЛИ» с двумя событиями на входе дано на рис. 12.3.

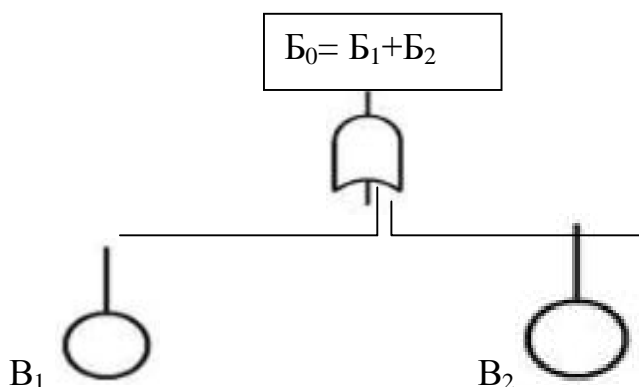


Рис. 12.3. Схема «ИЛИ» с двумя выходами

Событие  $B_0$  на выходе схемы «ИЛИ» записывается в булевой алгебре как

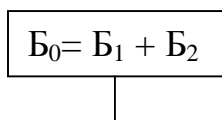
$$B_0 = B_1 + B_2,$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – события на входе. Схема «И» изображается символом  $*$  или  $\cap$ . Этот символ обозначает пересечение событий. Схема «И» с двумя входами показана на рис. 12.3.

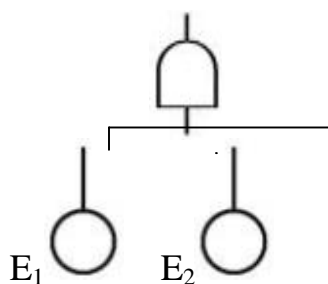
Событие  $B_0$  на выходе схемы «И» записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 B_2.$$

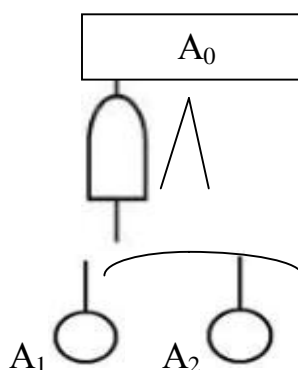
Схема «И» с приоритетом логически эквивалентна схеме «И», но отличается от неё тем, что события на её входе должны происходить в определённом порядке. Схема «И» с приоритетом, имеющая два входа, показана на рис. 12.4. и 12.5. В данном случае предполагается, что событие  $A_1$  должно наступить раньше события  $A$







**Рис. 12.4. Схема «И» с двумя входами**



**Рис. 12.5. Приоритетная схема «И» с двумя входами**

### 1.3. Преимущества и недостатки метода «дерева отказов»

Данный метод, как и любой другой, обладает определёнными достоинствами и недостатками. Так, например, метод даёт:

- представление о поведении системы, но требует от специалистов по надёжности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определённого отказа;
- помогает дедуктивно выявлять отказы; даёт конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений и анализа компромиссных решений;
- позволяет выполнять количественный и качественный анализ надёжности;
- облегчает анализ надёжности сложных систем.

Вместе с тем реализация метода требует значительных затрат средств и времени. Кроме того, полученные результаты трудно проверить и трудно учесть состояния частичного отказа элементов, поскольку при использовании

метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа. Существенные трудности возникают и при получении в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащих резервные узлы и восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов.

### **Литература**

1. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.
2. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
3. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.
4. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.
5. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.
6. ГОСТ Р 51901.13-2005(МЭК 61025:1990). Анализ дерева неисправностей

## **Лекция 13**

### **Основы теории и практики техногенного риска**

#### **13.1. Понятие техногенного риска**

При решении комплексных вопросов безопасности в развитых странах широко применяется методология риска, основу которой составляет определение последствий и вероятности нежелательных событий. Используя количественные показатели риска, в принципе можно «измерять» потенциальную опасность и даже сравнивать опасности различной природы.

При этом в качестве показателей опасности обычно понимают индивидуальный или социальный риск гибели людей (или, в общем случае, причинения определенного ущерба).

В широком смысле слова риск выражает возможную опасность, вероятность нежелательного события. Применительно к проблеме безопасности жизнедеятельности таким событием может быть ухудшение

здоровья или смерть человека, авария или катастрофа технической системы или устройства, загрязнение или разрушение экологической системы, гибель группы людей или возрастание смертности населения, материальных ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличения затрат на безопасность.

Аналитически риск выражает частоту реализации опасностей по отношению к возможному их числу. В общем виде

$$R = N(t) / Q(f) \quad (13.1)$$

где  $R$  – риск;

$N(t)$  – количественный показатель частоты нежелательных событий в единицу времени  $t$ ;

$Q(f)$  – число объектов риска, подверженных определенному фактору риска  $f$ .

Вероятность возникновения опасности – величина, существенно меньшая единицы.

Ожидаемый (прогнозируемый) риск  $R$  – это произведение частоты реализации конкретной опасности  $f$  на произведение вероятностей нахождения человека в «зоне риска» при различном регламенте технологического процесса:

$$R = f, \quad (13.2)$$

где  $f$  – число несчастных случаев (смертельных исходов) от данной опасности чел<sup>-1</sup>\*год<sup>-1</sup>, (для отечественной практики  $f = Kч*10^{-3}$ , т.е. соответствует значению коэффициента частоты несчастного случая  $Kч$ , деленного на 1000);

$\prod_i^n p_i$  – произведение вероятностей нахождения работника в «зоне риска».

Формирование опасных и чрезвычайных ситуаций – результат определенной совокупности факторов риска, порождаемых соответствующими источниками.

Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать индивидуальный, техногенный, экологический, социальный и экономический риск. Каждый вид его обуславливают характерные источники и факторы риска.

**Техногенный риск** – комплексный показатель надежности элементов техносферы. Он выражает вероятность аварии или катастрофы при

эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений:

$$R_T = \Delta T(t) / T(f), \quad (13.3)$$

где  $R_T$  – техногенный риск;

$\Delta T$  – число аварий в единицу времени  $t$  на идентичных технических системах и объектах;

$T$  – число идентичных технических систем и объектов, подверженных общему фактору риска  $f$ .

Источники техногенного риска:

- низкий уровень научно - исследовательских и опытно-конструкторских работ;

- опытное производство новой техники;

- серийный выпуск небезопасной техники;

- нарушение правил безопасной эксплуатации технических систем.

Наиболее распространенные факторы техногенного риска:

- ошибочный выбор по критериям безопасности направлений развития техники и технологий;

- выбор потенциально опасных конструктивных схем и принципов действия технических систем;

- ошибки в определении эксплуатационных нагрузок;

- неправильный выбор конструкционных материалов;

- недостаточный запас прочности; отсутствие в проектах технических средств безопасности;

- некачественная доводка конструкции, технологии, документации по критериям безопасности;

- отклонения от заданного химического состава конструкционных материалов;

- недостаточная точность конструктивных размеров;

- нарушение режимов термической и химико-термической обработки деталей;

- нарушение регламентов сборки и монтажа конструкций и машин;

- использование техники не по назначению;

- нарушение паспортных (проектных) режимов эксплуатации;

несвоевременные профилактические осмотры и ремонты;

- нарушение требований транспортирования и хранения.

## 13.2. Методология анализа и оценки риска

Методологическое обеспечение анализа риска – это совокупность методов, методик и программных средств, позволяющих всесторонне выявить опасности и оценить риск чрезвычайной ситуации, источником которой может являться промышленный объект. Выполнение требований к методологическому обеспечению анализа опасностей и риска необходимо для повышения точности и объективности результатов исследования опасностей промышленного объекта, а также для повышения эффективности выработки мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций.

Оценка риска – это анализ происхождения (возникновения) и масштабы риска в конкретной ситуации.

Реализацией республиканского закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» являются «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов (РД 03-418–01)».

Математическое выражение риска  $P$  – это соотношение числа неблагоприятных проявлений опасности  $n$  к их возможному числу  $N$  за определённый период времени, т.е.  $P = n / N$ . Помимо этого используется понятие «**степень риска**»  $R$ , т.е. вероятность наступления нежелательного события с учётом размера возможного ущерба от события. Степень риска можно представить как математическое ожидание величины ущерба от нежелательного события:

$$R(m) = \prod_{i=1}^n p_i m_i, \quad (13.4)$$

где  $p_i$  – вероятность наступления события, связанного с ущербом;

$m_i$  - случайная величина ущерба, причинённого экономике, здоровью и т.п.

**Принято различать:**

- **индивидуальный риск** – вероятность гибели человека при данном виде деятельности;

- **социальный риск** – зависимость числа погибших людей от частоты возникновения события, вызывающего поражение этих людей.

Значение индивидуального риска используется для количественной оценки потенциальной опасности конкретного рабочего места, вида деятельности, рабочей зоны и т.п., социального – для интегральной

количественной оценки опасных производственных объектов, характеристики масштаба воздействия аварии.

Несмотря на различие в подходах к последовательности этапов процесса управления риском, можно выделить три общие для всех документов составляющие этого процесса: информацию о производственной безопасности, анализ риска и контроль производственной безопасности.

**Анализ риска** базируется на собранной информации и определяет меры по контролю безопасности технологической системы, поэтому основная задача анализа риска заключается в том, чтобы обеспечить рациональное основание для принятия решений в отношении риска.

**Анализ риска или риск-анализ** – это систематическое использование имеющейся информации для выявления опасностей и оценки риска для отдельных лиц или групп населения, имущества или окружающей среды.

**Под опасностью понимается** источник потенциального ущерба или вреда или ситуация с возможностью нанесения ущерба, а **под идентификацией опасности** – процесс выявления и признания, что опасность существует, и определение её характеристик. Использование категории риск позволяет **переводить опасность** в разряд измеряемых категорий.

**Риск есть мера опасности.**

Оценка риска включает в себя анализ частоты, анализ последствий и их сочетание. Анализ риска проводится по следующей общей схеме:

1. Планирование и организация.
2. Идентификация опасностей.
  - 2.1. Выявление опасностей.
  - 2.2. Предварительная оценка характеристик опасностей.
3. Оценка риска.
  - 3.1. Анализ частоты.
  - 3.2. Анализ последствий.
  - 3.3. Анализ неопределённостей.
4. Разработка рекомендаций по управлению риском.

**Первое, с чего начинается любой анализ риска,** – это планирование и организация работ. Поэтому на первом этапе необходимо:

- указать причины и проблемы, вызывавшие необходимость проведения риск-анализа;
- определить анализируемую систему и дать её описание;
- подобрать соответствующую команду для проведения анализа;
- установить источники информации о безопасности системы;

- указать исходные данные и ограничения, обуславливающие пределы риск-анализа;

- чётко определить цели риск-анализа и критерий приемлемого риска.

**Следующий этап анализа риска** – идентификация опасностей.

**Основная задача** – выявление (на основе информации о данном объекте, результатов экспертизы и опыта работы подобных систем) и чёткое описание всех присущих системе опасностей. Здесь же проводится предварительная оценка опасностей с целью выбора дальнейшего направления деятельности:

- прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей;

- провести более детальный анализ риска;

- выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

В принципе процесс риск-анализа может заканчиваться уже на этапе идентификации опасностей.

После идентификации опасностей переходят к этапу оценки риска, на котором идентифицированные опасности должны быть оценены на основе критериев приемлемого риска, чтобы идентифицировать опасности с неприемлемым уровнем риска, что является основой для разработки рекомендации и мер по уменьшению опасностей. При этом критерий приемлемого риска и результаты оценки риска могут быть выражены как качественно (в виде текстового описания), так и количественно (например, в виде числа несчастных случаев или аварий в год).

Согласно определению оценка риска включает в себя анализ частоты и анализ последствий. Однако, когда последствия незначительны или частота крайне мала, достаточно оценить один параметр. Для анализа частоты обычно используются:

- исторические данные, соответствующие по типу системы, объекта или вида деятельности;

- статистические данные по аварийности и надёжности оборудования;

- логические методы анализа «деревьев событий» или «деревьев отказов» (при ортодоксальном подходе к предмету эти методы обычно рассматриваются как единственно приемлемые для оценки риска);

- экспертная оценка с учётом мнения специалистов в данной области.

Анализ последствий включает оценку воздействий на людей, имущество или окружающую среду. Для прогнозирования последствий необходимы модели аварийных процессов, понимание их сущности и сущности используемых поражающих факторов, так как нужно оценить физические эффекты нежелательных событий (пожаров, взрывов, выбросов токсичных

веществ) и использовать критерии поражения изучаемых объектов воздействия.

На этапе оценки риска следует проанализировать возможную неопределённость результатов, обусловленную неточностью информации по надёжности оборудования и ошибкам персонала, а также принятых допущений, применяемых при расчёте моделей аварийного процесса. Анализ неопределённости – это перевод неопределённости исходных параметров и предположений, использованных при оценке риска, в неопределённость результатов.

Наибольший объём рекомендаций по обеспечению безопасности вырабатывается с применением качественных (инженерных) методов анализа риска, позволяющих достигать основных целей риск-анализа при использовании меньшего объёма информации и затрат труда. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях – и единственно допустимы, в частности, для сравнения опасностей различной природы или при экспертизе особо опасных сложных технических систем.

Разработка рекомендаций по уменьшению риска (управлению риском) является заключительным этапом анализа риска. Рекомендации могут признать существующий риск приемлемым или указывать меры по уменьшению риска, т.е. меры по его управлению. Меры по управлению риска могут иметь технический, эксплуатационный или организационный характер.

## **Литература**

1. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надёжность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.
2. Надёжность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
3. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.
4. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.
5. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.
6. ГОСТ Р 51901.13-2005(МЭК 61025:1990). Анализ дерева неисправностей.



**Качественные методы анализа риска****14.1. Общие замечания**

Объектом анализа опасностей как источника техногенного риска является система «человек–машина–окружающая среда (ЧМС)», в которой в единый комплекс объединены технические объекты, люди и окружающая среда, взаимодействующие друг с другом.

Анализ опасностей и риска позволяет определить источники опасностей, потенциальные аварии и катастрофы, последовательности развития событий, вероятности аварий, величину риска, величину последствий, пути предотвращения аварий и смягчения последствий.

Методы определения потенциального риска можно разделить на:

- инженерные методы с использованием статистики, когда производится расчёт частот, проводится вероятностный анализ безопасности и построение «деревьев опасности»;
- модельные методы основаны на построении моделей воздействия опасных и вредных факторов на отдельного человека, на профессиональные и социальные группы населения;
- экспертные методы включают определение вероятностей различных событий на основе опроса опытных специалистов-экспертов;
- социологические методы, которые основаны на опросе населения.

Для отражения различных аспектов опасности эти методы применяются в комплексе. Анализ риска описывает опасности качественно и количественно и заканчивается планированием предупредительных мероприятий. Он базируется на знании алгебры логики и событий, теории вероятностей, статистическом анализе, требует инженерных знаний и системного подхода.

Качественные методы анализа риска позволяют определить источники опасностей, потенциальные аварии и несчастные случаи, последовательности развития событий, пути предотвращения аварий (несчастных случаев) и смягчения последствий.

**14.2. Анализ опасностей**

Анализ риска начинают с предварительного исследования, позволяющего идентифицировать источники опасности. Затем проводят детальный качественный анализ. Выбор качественного метода анализа риска

зависит от цели анализа, назначения объекта и его сложности. Качественные методы анализа опасностей включают:

- предварительный анализ опасностей;
- анализ последствий отказов;
- анализ опасностей методом потенциальных отклонений;
- анализ ошибок персонала;
- причинно-следственный анализ;
- анализ опасностей с помощью «дерева причин»;
- анализ опасностей с помощью «дерева последствий».

**Предварительный анализ опасностей (ПАО)**, заключается в выявлении источника опасностей, определении системы или событий, которые могут вызывать опасные состояния, характеристике опасностей в соответствии с вызываемыми ими последствиями.

Предварительный анализ опасностей осуществляют в следующем порядке:

- изучают технические характеристики объекта, системы, процесса, используемые энергетические источники, рабочие среды, материалы и устанавливают их повреждающие свойства;
- устанавливают нормативно-техническую документацию, действие которой распространяется на данный технический объект, систему, процесс;
- проверяют существующую техническую документацию на её соответствие нормам и правилам безопасности;
- составляют перечень опасностей, в котором указывают идентифицированные источники опасностей, повреждающие факторы, потенциальные аварии, выявленные недостатки.

В целом ПАО представляет собой первую попытку выявить оборудование технической системы (в её начальном варианте) и отдельные события, которые могут привести к возникновению опасностей. Этот анализ выполняется на начальном этапе разработки системы. Детальный анализ возможных событий обычно проводится с помощью «дерева отказов», после того как система полностью определена.

**Анализ последствий отказов (АПО)** – качественный метод идентификации опасностей, основанный на системном подходе и имеющий характер прогноза. АПО является анализом индуктивного типа, с помощью которого систематически, на основе последовательного рассмотрения одного элемента за другим, анализируются все возможные виды отказов или аварийные ситуации и выявляются их результирующие воздействия на систему.

Отдельные аварийные ситуации и виды отказов элементов позволяют определить их воздействие на другие близлежащие элементы и систему в целом. АПО осуществляют в следующем порядке:

- техническую систему (объект) подразделяют на компоненты;
- для каждого компонента выявляют возможные отказы;
- изучают потенциальные аварии, которые могут вызвать отказы на исследуемом объекте;
- отказы ранжируют по опасностям и разрабатывают предупредительные меры.

Результаты анализа последствий отказа представляются в виде таблиц с перечнем оборудования, видов и причин возможных отказов, с частотой, последствиями, критичностью, средствами обнаружения неисправности (сигнализаторы, приборы контроля и т.п.) и рекомендациями по уменьшению опасности.

В качестве примера в табл. 14.1 приведены показатели (индексы) уровня и критерии критичности по вероятности и тяжести последствий отказа.

Для анализа выделены четыре группы, которым может быть нанесён ущерб от отказа: персонал, население, имущество (оборудование, сооружения, здания, продукция и т.п.), окружающая среда.

### 14.3. Критерии отказов по тяжести последствий

#### Классификация отказов включает:

- **катастрофический отказ** – приводит к смерти людей, существенному ущербу имуществу, наносит невосполнимый ущерб окружающей среде;
- **критический (некритический) отказ** – угрожает (не угрожает) жизни людей, приводит (не приводит) к существенному ущербу имуществу, окружающей среде;
- **отказ с пренебрежимо малыми последствиями** – отказ, не относящийся по своим последствиям ни к одной из первых трёх категорий.

#### Категории (критичность) отказов:

- А** – обязателен количественный анализ риска или требуются особые меры обеспечения безопасности;
- В** – желателен количественный анализ риска или требуется принятие определённых мер безопасности;

Таблица 14.1. Матрица «Вероятность – тяжесть последствий»

	Частота воз –	Тяжесть последствий отказа
--	---------------	----------------------------

Отказ	никновения отказа в ГОД	Катастро - фического	Критиче - ского	Некрити- ческого	Сpreneбрежи- мо малыми по следствиями
Частный	> 1	А	А	А	С
Вероятный	$10^{-4}$	А	А	Б	С
Возможный	$10^{-2} \dots 10^{-4}$	А	Б	Б	С
Редкий	$10^{-4} \dots 10^{-6}$	А	Б	С	Д
Практически невероятный	$< 10^{-6}$	Б	С	С	Д

С – рекомендуется проведение качественного анализа опасностей или принятие некоторых мер безопасности;

Д – анализ и принятие специальных (дополнительных) мер безопасности не требуется.

Этим методом можно оценить опасный потенциал любого технического объекта. По результатам анализов отказов могут быть собраны данные о частоте отказов, необходимые для количественной оценки уровня опасности рассматриваемого объекта.

**Анализ опасностей методом потенциальных отклонений (АОМПО)** включает процедуру искусственного создания отклонений с помощью ключевых слов. Для этого разбивают технологический процесс или техническую систему на составные части и, создавая с помощью ключевых слов отклонения, систематично изучают их потенциальные причины и те последствия, к которым они могут привести на практике.

В процессе анализа для каждой составляющей опасного производственного объекта или технологического блока определяются возможные отклонения, причины и указания по их недопущению. При характеристике отклонения используются ключевые слова «нет», «больше», «меньше», «так же, как», «другой», «иначе, чем», «обратный» и т.п. Применение ключевых слов помогает исполнителям выявить все возможные отклонения. Конкретное сочетание этих слов с технологическими параметрами определяется спецификой производства.

Примерное содержание ключевых слов следующее:

- «*нет*» – отсутствие прямой подачи вещества, когда она должна быть;
- «*больше (меньше)*» – увеличение (уменьшение) значений режимных переменных по сравнению с заданными параметрами (температуры, давления, расхода);
- «*так же, как*» – появление дополнительных компонентов (воздух, вода, примеси);
- «*другой*» – состояние, отличающееся от обычной работы (пуск, остановка, повышение производительности и т.д.);
- «*иначе, чем*» – полное изменение процесса, непредвиденное событие, разрушение, разгерметизация оборудования;
- «*обратный*» – логическая противоположность замыслу, появление обратного потока вещества.

Отклонения, имеющие повышенные значения критичности, далее рассматриваются более детально, в том числе при построении сценариев аварийных ситуаций и количественной оценки риска.

Степень опасности отклонений может быть определена количественно путём оценки вероятности и тяжести последствий рассматриваемой ситуации по критериям критичности аналогично методу АПО (см. табл. 14.1).

### **Литература**

1. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.
2. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
3. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.
4. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.
5. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.
6. ГОСТ Р 51901.13-2005(МЭК 61025:1990). Анализ дерева неисправностей.

## **Лекция 15**

# Количественная оценка риска, приемлемый риск. Управление риском

## 15.1. Количественная оценка риска[5]

Количественный анализ опасностей даёт возможность определить вероятности аварий и несчастных случаев, величину риска, величину последствий. Установление логических связей между событиями необходимо для расчёта вероятностей аварии или несчастного случая. Методы количественного анализа риска, основаны на расчёте нескольких показателей риска.

Проведение количественного анализа требуют большого объёма информации по аварийности, надёжности оборудования, выполнения экспертных работ, времени пребывания людей в опасных зонах и других факторов.

Количественный анализ риска позволяет оценить и сравнить различные опасности по единым показателям:

- на стадии проектирования и размещения опасного производственного объекта;
- при обосновании оптимальных мер безопасности;
- при оценке опасности крупных аварий на опасных производственных объектах, имеющих однотипные технические устройства (например, магистральные трубопроводы);
- при комплексной оценке опасностей аварий для людей, имущества и окружающей природной среды.

При анализе опасностей сложные системы разбивают на подсистемы.

**Подсистемой называют** часть системы, которую выделяют по определённому признаку, отвечающему конкретным целям и задачам функционирования системы. В свою очередь, подсистемы состоят из компонентов – частей системы, которые рассматриваются без дальнейшего деления как единое целое.

**Логический анализ внутренней структуры системы** и определение вероятности нежелательных событий  $E$  как функции отдельных событий  $E_i$  являются одной из задач анализа опасностей.

Количественная оценка риска представляет собой процесс оценки численных значений вероятности и последствий нежелательных процессов, явлений, событий, к достоверности которых необходимо подходить с определенной долей осторожности.

Риск характеризуют двумя величинами – вероятностью события  $P$  и последствиями  $X$ , которые в выражении математического ожидания выступают как множители:

$$R = P * X.$$

По отношению к источникам опасностей оценка риска  $R$  предусматривает разграничение нормального режима работы  $R_n$  и аварийных ситуаций  $R_{ав}$ :

$$R = R_n + R_{ав} = P_n * X_n + P_{ав} * X_{ав} .$$

При неизвестных последствиях, под риском понимают вероятность  $P_i$  наступления определённого сочетания нежелательных событий

$$R = \sum_{i=1}^n P_i$$

При необходимости можно использовать определение риска как вероятности превышения предела  $x$ :

$$R = P \{ \xi > x \},$$

где  $\xi$  – случайная величина.

**Техногенный риск** оценивают по формуле, включающей как вероятность нежелательного события, так и величину последствий в виде ущерба  $U$ :

$$R = P U.$$

Если каждому нежелательному событию, происходящему с вероятностью  $P_i$ , соответствует ущерб  $U_i$ , то величина риска будет представлять собой ожидаемую величину ущерба

$$R = U_* = \sum_{i=1}^n P_i U_i$$

Если все вероятности наступления нежелательного события одинаковы ( $P_i = P, i = 1, n$ ), то следует

$$R = P \sum_{i=1}^n U_i .$$

Когда существует опасность здоровью и материальным ценностям, риск целесообразно представлять в векторном виде с различными единицами измерения по координатным осям:

$$\vec{R} = \vec{U} * \vec{P}.$$

Перемножение в правой части этого уравнения производится покомпонентно, что позволяет сравнивать риски.

Индивидуальный риск можно определить как ожидаемое значение причиняемого ущерба  $U_*$  за интервал времени  $T$  и

$$R = U_* / (MT) .$$

Общий риск для группы людей (коллективный риск)

$$R = U_* / T .$$

## 15.2. Критерии приемлемого риска [5]

Концепция абсолютной безопасности недавнего времени была фундаментом, на котором строились нормативы безопасности во всем мире. Для предотвращения аварий внедрялись дополнительные технические устройства – инженерные системы безопасности, принимались организационные меры, обеспечивающие высокий уровень дисциплины, строгий регламент работы. Считалось, что такой инженерный, детерминистский подход позволяет исключить любую опасность для населения и окружающей среды.

Однако сегодня из-за беспрецедентного усложнения производств и появления принципиально новых технологий, возросшей сети транспортных и энергетических коммуникаций, концепция абсолютной безопасности стала неадекватна внутренним законам техносферы и биосферы.

Поэтому человеческое сообщество пришло к пониманию невозможности создания “абсолютной безопасности” реальной действительности, и следует стремиться к достижению такого уровня риска от опасных факторов, который можно рассматривать как “приемлемый”.

Уровень риска от факторов опасности, обусловленных хозяйственной деятельностью, является “приемлемым”, если его величина (вероятность реализации или возможный ущерб) настолько незначительна, что ради получаемой при этом выгоды в виде материальных и социальных благ, человек или общество в целом готово пойти на риск.

**Особую роль для общества отводится установлению приемлемого риска.** В зарубежной практике при решении производственных задач считается приемлемым значение индивидуального риска  $1*10^{-8}$ . Индивидуальный риск выше  $1*10^{-6}$  – неприемлем. Однако эти значения – отправные данные для обоснования пороговых значений риска.



**Норматива допустимого социального риска не существует. Косвенно социальный риск определяется опасностью производственных объектов (предприятий).**

Оценка опасности объектов предполагает:

- анализ опасных факторов производства;
- установление численных значений вероятности возникновения опасных ситуаций;
- анализ их развития; прогноз возможного числа погибших людей.

**Принятие риска в качестве одного из показателей безопасности** ставит несколько важных задач нормирования, таких как обоснование критериальных значений риска, контроля риска, способы верификации расчетных методик.

Среди подходов, предложенных для обоснования критериальных значений риска, следует отметить метод экономического анализа безопасности, основанный на учете затрат на обеспечение безопасности и потерь от возможных аварий. Концепция нормирования безопасности предлагает задание риска с учётом следующих условий:

– абсолютная безопасность не может быть обеспечена, объект может быть только относительно безопасен;

- связи с социально-экономическим состоянием общества как производной этого состояния;

- определение риска осуществляется путем выявления различных факторов, влияющих на безопасность, и их количественную оценку.

Существуют и другие аспекты нормирования безопасности:

- риск не должен превышать уровня, достигнутого для сложных технических объектов с учетом природных воздействий;

- риск должен быть снижен настолько, насколько это практически достижимо в рамках соответствующих ограничений;

- не должно быть составляющих риска, резко превышающих другие (аналог принципа равнонадежности, применяемого при обеспечении надежности изделий).

Поэтому, оценивая приемлемость различных уровней экономического риска на первом этапе, можно ограничиться рассмотрением риска лишь тех вредных последствий, которые, в конечном счете, приводят к смертельным исходам, в связи с достаточно надежными статистическими данными. Тогда, понятие “экологический риск” может быть сформулировано как отношение величины возможного ущерба, выраженного в соответственной смертности людей.

В качестве отправного значения *абсолютного риска* принимают величину летальных исходов (ЛИ):

$$R_A = 10^{-4} \text{ ЛИ/}(чел.год).$$

В качестве отправного значения допустимого (приемлемого)  $R_D$  риска при наличии отдельно взятого источника опасности принимают:

$$R_D = 10^{-5} \text{ ЛИ/}(чел. год);$$

$$R_D = 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ НС/}(чел. год),$$

где НС – случаи нетрудоспособности.

Для населения величина дополнительного риска, вызванного техногенными причинами, не должна превышать отправное значение абсолютного риска:

$$R \leq R_A.)$$

Для отдельно взятого источника опасности, учитывая, что индивидуальный риск зависит от расстояния  $R = R(r)$ , условие безопасности можно записать в виде:

$$R(r) \leq R_D.$$

В настоящее время по международной договоренности принято считать, что действие техногенных опасностей (технический риск) должно находиться в пределах от  $10^{-7} \dots 10^{-6}$  (смертельных случаев  $чел^{-1} * год^{-1}$ ), а величина  $10^{-6}$  является максимально приемлемым уровнем индивидуального риска. В национальных правилах эта величина используется для оценки пожарной безопасности и радиационной безопасности.

Приемлемый риск сочетает в себе технические, экологические, социальные аспекты и представляет некоторый компромисс между приемлемым уровнем безопасности и экономическими возможностями его достижения, т.е. можно говорить о снижении индивидуального, технического или экологического риска, но нельзя забывать о том, сколько за это придется заплатить и каким в результате окажется социальный риск.

На практике часто используются методы анализа и критерии приемлемого риска, основанные на результатах экспертных оценок специалистов. Рассматриваемый объект ранжируется по степени риска на четыре (или больше) групп. Высокий уровень риска считается неприемлемым, промежуточный требует выполнения программы работ по уменьшению уровня риска, низкий считается приемлемым, а незначительный не рассматривается.

Есть все основания считать, что из всех возможных вариантов подходов к объективному определению приемлемого риска целесообразно выбирать экологический подход, который в качестве объекта опасности рассматривает не только человека, а и весь комплекс окружающей его среды. Остальные

подходы: социальный, экономический, технический отличаются произволом, связанным с неэкологическими потребностями и интересами общества, с известными компромиссами.

### **15.3. Управление риском**

В соответствии с концепцией безопасности населения и окружающей среды практическая деятельность в области управления риском должна быть построена так, чтобы общество в целом получало наибольшую доступную сумму природных благ.

Управление риском – это анализ рискованной ситуации, разработка и обоснование управленческого решения, нередко в форме правового акта, направленного на минимизацию риска.

В принципах управления риском заложены стратегические и тактические цели.

**В стратегических целях** выражено стремление общества к достижению максимально возможного уровня безопасности общества в целом.

**В тактических целях** выражено стремление общества к увеличению продолжительности жизни. В них оговариваются как интересы групп населения, так и каждой личности в защите от чрезмерного риска.

В управление риском должен быть включен весь совокупный спектр существующих в обществе опасностей, и общий риск от них для любого человека и для общества в целом **не может превышать “приемлемый”** для него уровень.

Политика в области управления риском должна строиться в рамках строгих ограничений воздействий на технические системы, природные экосистемы опасностей, не превышающих по величине предельно допустимых уровней, концентраций и экологических нагрузок.

Для проведения анализа риска, с учётом установленных допустимых пределов в соответствии с требованиями безопасности для принятия управляющих решений необходимо:

- иметь информационной системы, позволяющей оперативно контролировать существующие источники опасности и состояние объектов возможного поражения;
- обладать сведениями о хозяйственной деятельности, проектах и технических решениях, которые могут влиять на уровень техногенной и экологической безопасности и оценки связанного с ними риска;
- осуществлять экспертизу безопасности и сопоставление альтернативных проектов и технологий, являющихся источниками риска;

- составлять рискологические прогнозы и формулировать аналитическое определение уровня риска;
- ориентироваться на объективные оценки риска с целью воздействия на общественное мнение и принятие мер к его минимизации;
- вести пропаганду научных данных об уровнях техногенного и экологического рисков.

Модель управления риском состоит из четырех частей и этапов.

**Первый этап** – проведение сравнительной характеристики рисков с целью установления приоритетов и установление степени опасности (вредности).

**Второй этап** – определение приемлемости риска с учётом ряда социально-экономических факторов:

- выгод (потерь), обусловленных видом деятельности;
- регулирующих меры принимаемые к уменьшению негативного влияния производства на среду и здоровье человека.

В выполнении практических действий по созданию оптимального сочетания “нерисковых” факторов с “рисковыми” проявляется суть процесса управления риском.

Возможны три варианта принимаемых решений:

- риск приемлем полностью;
- риск приемлем частично;
- риск неприемлем полностью.

В настоящее время уровень пренебрежимого предела риска обычно устанавливаются как 1% от максимально допустимого.

В двух последних случаях необходимо установить пропорции контроля, которые входят в задачу третьего этапа процедуры управления риском.

**Третий этап** – определение пропорции контроля – заключается в выборе одной из “типовых” мер, способствующих уменьшению (в первом и во втором случае) или устранению (в третьем случае) риска.

**Четвертый этап** – принятие регулирующего решения на основе нормативных актов (законов, постановлений, инструкций) и их положений, соответствующих реализации той “типовой” меры, которая была установлена на предшествующей стадии. Этот этап увязывает все стадии оценки риска в единый процесс принятия решений, в единую концепцию риска.

#### **15.4. Применение теории риска в технических системах**

Вычисленные на основе расчетов на ЭВМ параметры риска следует рассматривать как приближенные. Отклонения расчетных параметров от

действительных представляют собой случайные величины, которые зависят от условий задачи.

**Вероятностный метод** вычисления риска позволяет получить новую информацию о том, какое влияние на величину риска оказывают разные источники неопределенности на показатели риска. Принцип сбалансированного риска требует, чтобы все объекты проектировались на одинаковую степень риска.

Риск определяется на основе обработки статистическими методами большого числа наблюдений. **Величина риска зависит от ожидаемой выгоды.** Повышение показателя вероятности риска (например, с  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$ ) приводит к снижению расходов на создание конструкций, оборудования, устройств и т.д. и увеличению ожидаемой выгоды, к снижению надёжности конструкций и их разрушению через более короткий срок. Поэтому принятие величины риска является ответственной задачей, которая может быть решена только в результате проведения глубокого статистического анализа.

Риск, характеризуемый числом  $10^{-3}$  случаев на одного человека в год, является совершенно неприемлемым. Уровень риска  $10^{-4}$  требует принятия мер.

Риск в автомобильных авариях в США достигает уровня  $2,8 \cdot 10^{-4}$ . Уровень риска  $10^{-5}$  соответствует естественным случайным событиям и соответствует риску несчастных случаев при купании в море ( $3,7 \cdot 10^{-5}$ ). Несчастные случаи, обусловленные риском  $10^{-6}$  относятся к приемлемому - избежать этот риска может каждый, соблюдая элементарные правила предосторожности.

Аналогичные показатели риска могут быть установлены для всех изделий и конструкций с учетом срока службы, стоимости, срока восстановления и т.д.

В специальной литературе подробно рассматривается экономический риск, связанный с планированием промышленного производства, называемый хозяйственным риском. Величина хозяйственного риска определяется на основании опыта и соответствующей обработки накопленных статистических данных, которые экстраполируются на проектируемый объект. Это помогает найти численное выражение для ожидаемого риска. Стоимость сооружения зависит от принятой при проектировании величины риска.

Таким образом, увеличение показателя риска приводит к удешевлению конструкций, а уменьшение показателя риска вызывает удорожание объекта. При большом риске снижается стоимость первоначальных затрат на создание объекта, однако в дальнейшем в связи с повышением аварийности, которая

неизбежна в связи с понижением надёжности объекта, расходы на ликвидацию последствий которой могут значительно превысить запланированные.

## **Литература**

1. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надёжность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.
2. Надёжность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
3. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.
4. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.
5. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.
6. ГОСТ Р 51901.13-2005(МЭК 61025:1990). Анализ дерева неисправностей

## **Лекция 16**

### **Правовые основы анализа риска и управления промышленной безопасностью**

#### **16.1. Общие положения**

Усложнение технологий, использование широкой номенклатуры химических веществ привело к тому, что происходящие техногенные аварии стали носить всё более катастрофический характер, оказывая пагубное воздействие на здоровье людей и окружающую природную среду. Крупные промышленные аварии 1970 – 1980-х гг. заставили законодателей и промышленников пересмотреть своё отношение к вопросам промышленной безопасности. Возникла очевидная необходимость появления законов, регулирующих специфические вопросы промышленной безопасности, которые не нормируются ни трудовым, ни экологическим правом. В 1980-е гг. стало развиваться законодательство по промышленной безопасности во

многих странах (ЕС, США, Канаде, Японии). Структура систем законодательства в большинстве случаев, в том числе и в России и ДНР, представляет многоступенчатую пирамиду, в вершине которой располагается Основной закон страны (Конституция) или Головной закон, имеющий либо объединяющие вопросы охраны труда, экологии, гигиены труда и промышленной безопасности. Ниже расположены законы по промышленной безопасности (не во всех странах), которые принимаются либо парламентом, либо региональными органами власти. На следующей ступени межотраслевые нормативные документы, принимаемые правительством на основании законов. Следующая ступень – отраслевая нормативная и нормативно-техническая документация, утверждённая соответствующими компетентными государственными органами. За ними следуют различные ведомственные инструкции, положения, правила и т.д.

Основные элементы правового регулирования промышленной безопасности, составляющие национальные системы регулирования национальной безопасности, сводятся к следующим требованиям.

## **16.2. Классификация промышленных объектов по степени опасности**

Первое мероприятие в любой системе контроля за опасностями – разработка правительствами через компетентный орган соответствующих критериев, согласно которым должно определяться, какие объекты представляют наибольшую потенциальную угрозу для безопасности. В большинстве стран (США, Германии, Нидерландах, Норвегии, Великобритании, Франции) классификация промышленных объектов по опасности производится по наличию опасных веществ на объекте. Такой же подход предлагается в Директиве и Конвенции о трансграничном воздействии промышленных аварий. В законодательных актах устанавливается перечень опасных веществ и их пороговых количеств, при превышении которых на промышленном объекте последствий относят к категории опасного. Однако в законодательной международной практике известны и другие подходы к идентификации. Например, законодательством Бельгии опасные промышленные объекты классифицируются по видам опасной деятельности (шахты и каменоломни; паровые машины; предприятия по производству взрывчатых веществ; ядерные реакторы и установки, использующие радиоактивные материалы; предприятия, производящие и использующие отравляющие вещества). В Греции используется иной классификационный признак – по видам опасности. Промышленные объекты классифицируются

как опасные (возможность взрыва, пожара и т.п.), вредные для здоровья (дым, газы и т.п.), дискомфортные (шум, запах и т.д.).

### **16.3. Оценка опасности промышленного объекта**

Необходимо определить:

- возможные сбои, неполадки и ошибки, которые могут привести к аварии, а также сценарии возможных аварий;
- необходимые превентивные технические и организационные меры, которые должен принять предприниматель во избежание аварии;
- возможные последствия аварий;
- меры, которые должны быть приняты при локализации аварии и ликвидации её последствий.

Для оценки опасности могут использоваться различные методы, такие как предварительный анализ опасности, анализ «дерева отказов» и анализ последствий аварий, оценка риска. Какой бы метод ни применялся, цель оценки опасности – определение потенциальных причин отказа в работе или аварий на промышленном объекте. В большинстве стран критерий оценки опасности – качественные показатели. В Нидерландах используют количественный показатель степени риска.

### **16.4. Требования к размещению промышленного объекта**

При размещении промышленного объекта должны учитываться возможные отрицательные воздействия на окружающую среду и население. Законодательно устанавливается процедура получения разрешения на размещение промышленного объекта, обеспечивающее участие в нём государства, предпринимателя и общественности. Политика правильного размещения объекта применяется только к новым объектам. Что касается уже существующих, то она может быть направлена на ограничение развития районов в непосредственной близости от промышленных объектов составляют наибольшую потенциальную угрозу для безопасности. В большинстве стран (США, Германии, Нидерландах, Норвегии, Великобритании, Франции) классификация промышленных объектов по опасности производится по наличию опасных веществ на объекте. Такой же подход предлагается в Директиве по Конвенции о трансграничном воздействии промышленных аварий.



В развитых странах, таких как Нидерланды, Бельгия, Япония, в определенных случаях правительство компенсирует населению затраты на переселение из особо техногенно опасных регионов.

### **16.5. Система лицензирования**

Законодательствами многих стран предусматривается предоставление компетентным органам право ограничивать производство путём установления лицензионного порядка. В большинстве стран требования по лицензированию промышленной деятельности касаются промышленных объектов, отнесённых к категории опасных.

### **16.6. Экспертиза промышленной безопасности**

Проведение экспертизы промышленной безопасности предусматривается на всех стадиях функционирования промышленных объектов, начиная со стадии проектирования. Декларации безопасности также могут стать объектом экспертизы. В практическом руководстве Международного бюро труда «О предупреждении крупных промышленных аварий» говорится о необходимости проведения экспертиз промышленных объектов. Они могут проводиться как в обязательном порядке в соответствии с действующим законодательством, так и по поручению специально уполномоченных органов, местных органов власти или общественности.

### **16.7. Информирование государственных органов и общественности об опасностях и авариях**

По оценке западных специалистов, одно из наивысших достижений демократии – «право общественности на информацию о вредном воздействии» (Community Right-to-Know), внесённое в США в раздел 313 части 111 Закона о поправках к Суперфонду (1986). Эта информация должна включать описание:

- установки – объекта потенциальной опасности;
- потенциально опасных видов деятельности, опасных используемых веществ и методов контроля за ними;
- способов оповещения о чрезвычайных ситуациях;
- действий населения, принимаемых в случае чрезвычайных ситуаций;
- известного воздействия на людей в результате происшедших ранее аналогичных аварий;

- мер, которые необходимо принимать в случае поражения в результате аварии.

Рекомендации по определению территории вокруг объекта, на которой население необходимо информировать о нём, могут дать эксперты проводившие экспертизу опасности. Информация должна периодически повторяться и при необходимости дополняться, обновляться с учётом возможных процессов миграции населения. В странах, где введена процедура декларирования безопасности, указанная информация для опасных промышленных объектов предоставляется в составе декларации безопасности.

Местные власти и администрация должны проверять, насколько такая информация доходит до людей и полно ими понимается. При необходимости принимать меры, направленные на усовершенствование этой работы.

Во время чрезвычайных ситуаций администрация должна информировать население, проживающее вблизи опасного объекта, о развитии аварии, результатах расследования причин возникновения чрезвычайной ситуации и возможном ближайшем или долгосрочном воздействии последствий аварии на население и окружающую среду.

## **16.8. Ответственность производителей**

Вопросы ответственности администрации предприятия регулируются во всём блоке законодательства, касающегося вопросов охраны окружающей среды, труда и обеспечения промышленной безопасности. Эти вопросы обычно рассматриваются в головных законодательных актах. В США – это закон «О профессиональной безопасности и здравоохранении», в России – это «Закон об охране окружающей среды», в Великобритании – закон «Об обеспечении охраны труда и здоровья», в Нидерландах и Норвегии – закон «Об охране окружающей предприятие природной среды» и т.д. Усиление ответственности предприятий, на которых производят, перевозят, обрабатывают или хранят опасные вещества, регулируется в поправках 1990 г. к Закону США «О чистом воздухе». Администрация промышленных объектов несёт ответственность за проектирование и безопасную эксплуатацию установки, происшедшие аварии и сведение к минимуму их последствий. Ответственность за последствия аварий по западному законодательству наступает вне зависимости от вины.

## **16.8. Учёт и расследование**

При проведении оценки опасности и составлении декларации безопасности необходимо учитывать опыт всех происшедших аварий, анализировать причины их возникновения. Поэтому требование учёта и расследования аварий – обязательный элемент законодательства по промышленной безопасности. Информацию об авариях администрация промышленного объекта обязана предоставлять в компетентные органы власти.

Здесь следует отметить, что учёту и расследованию причин мелких аварий придаётся большое значение, поскольку любая мелкая авария при определённом стечении обстоятельств может привести к катастрофическим последствиям. В Европейском сообществе ведётся банк данных по учёту аварий. Члены ЕЭС обязаны предоставлять туда информацию о происшедших авариях. Такое требование тоже содержится и в национальных законодательных актах. Например, в Законе ФРГ «Об аварийных ситуациях» указано, что владелец установки обязан сообщить в компетентные органы об аварии, а также не позднее чем в недельный срок сообщить о причинах аварии и мерах, принятых для её локализации и ликвидации её последствий.

## **16.9. Участие органов местного самоуправления и общественности в процессах обеспечения промышленной безопасности**

Большое внимание в законодательстве развитых стран уделяется участию местных органов власти и общественности в регулировании промышленной деятельности. Они могут повлиять на решение о размещении промышленного объекта, принимать участие в информировании граждан об опасных объектах и авариях, которые могут нанести ущерб населению, в подготовке к действиям во время аварий и чрезвычайных ситуаций. В США разработана такая система, которую в настоящее время пытаются адаптировать и в других странах, в частности в России. В ней детально разработан механизм участия местных органов и общественности в регулировании промышленной безопасности.

## **16.10. Государственный контроль и надзор и контроль и надзор за промышленной безопасностью**

Любая система надзора и контроля объектов повышенной опасности должна строиться на государственном уровне, т.е. должен существовать

специальный орган (или органы), ответственный за промышленную безопасность и охрану труда. В России, например, Госатомнадзор РФ – государственная организация, занимающаяся надзором за безопасной эксплуатацией объектов ядерной энергетики (АЭС, АСТ, АТЭЦ и др.), во Франции – служба промышленной экологии и Бюро оценки риска и промышленного загрязнения, в Норвегии – Государственный орган по борьбе с загрязнениями и Директорат по предотвращению пожаров и взрывов. Госатомнадзор РФ организует и осуществляет государственное регулирование и надзор за безопасностью при производстве, обращении и использовании в мирных и оборонных целях атомной энергии, ядерных материалов, радиоактивных веществ и изделий на их основе с целью обеспечения безопасности персонала ядерно- и(или) радиационно опасных объектов и населения, защиты окружающей среды и интересов безопасности РФ.

Госатомнадзор РФ в пределах своей компетенции принимает решения, обязательные для органов государственного управления и предприятий, расположенных на территории РФ, независимо от их подчинённости и форм собственности, а также должностных лиц и граждан. Конкретные задачи, функции и права Госатомнадзора РФ предусмотрены Положением о нём. В частности, Госатомнадзор РФ имеет право запрещать применение изделий и технологий, не обеспечивающих ядерную и радиационную безопасность персонала, населения и окружающей среды, привлекать к административной ответственности должностных лиц министерств и ведомств, органов исполнительной власти, предприятий, виновных в нарушении требований, правил, норм ядерной и радиационной безопасности.

Основной задачей Госэнергонадзора в РФ является осуществление контроля за техническим состоянием и безопасным обслуживанием электрических и теплоиспользующих установок потребителей электрической и тепловой энергии, рациональным и эффективным использованием электрической и тепловой энергии на предприятиях, в организациях и учреждениях независимо от их ведомственной принадлежности и форм собственности.

В России Государственный надзор за соблюдением правил по безопасному ведению работ в отдельных отраслях промышленности и на некоторых объектах осуществляется **Государственным комитетом РФ по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору (Госгортехнадзор РФ)** и его местными органами. Надзор осуществляется в угольной, горнорудной, горнохимической, нерудной, нефтедобывающей и газодобывающей, химической, металлургической и

нефтеперерабатывающей промышленности, в геологоразведочных экспедициях и партиях, а также при устройстве и эксплуатации подъёмных сооружений, котельных установок и сосудов, работающих под давлением, трубопроводов для пара и горячей воды, объектов, связанных с добычей, транспортировкой, хранением и использованием газа, при ведении взрывных работ в промышленности.

На Госгортехнадзор РФ возложены *следующие* функции:

- организация и осуществление государственного регулирования промышленной безопасности и государственного надзора за соблюдением центральными органами федеральной исполнительной власти, предприятиями, объединениями и организациями, независимо от их организационно-правовых форм, должностными лицами и гражданами требований по безопасному ведению работ в промышленности, устройству и безопасной эксплуатации оборудования;

- целях обеспечения соблюдения всеми пользователями недр законодательства РФ, утверждённых в установленном порядке;

- требование (правил и норм) безопасного ведения работ, предупреждения и устранения их вредного влияния на население, окружающую природную среду, объекты народного хозяйства, а также по охране недр;

- разработка и осуществление совместно с центральными органами федеральной исполнительной власти, органами исполнительной власти республик в составе РФ, краёв, областей, автономных образований, местными администрациями, а также с предприятиями, объединениями и организациями мер по профилактике аварий и производственного травматизма;

- установление требований (правил и норм) по безопасному ведению работ, изготовлению и безопасной эксплуатации оборудования, а также по охране недр и переработке минерального сырья;

- осуществление лицензирования отдельных видов деятельности, связанных с повышенной опасностью промышленных производств (объектов) и работ, а также обеспечением безопасности при пользовании недрами;

- участие в разработке и контроль за реализацией научно-технических программ по приоритетным направлениям обеспечения безопасности промышленных производств, персонала и населения;

- обобщение практики применения законодательства РФ в области безопасности ведения работ в промышленности, охраны и использования

недр, применения взрывчатых материалов в народном хозяйстве и разработка предложений по его совершенствованию.

Госгортехнадзор РФ осуществляет государственное регулирование и надзор на территории РФ через образуемые им региональные органы (округа).

*Госгортехнадзору РФ предоставлено право:*

- проводить беспрепятственно проверки подконтрольных предприятий и объектов по вопросам, относящимся к его компетенции, а также привлекать по согласованию с центральными органами федеральной исполнительной власти, объединениями и предприятиями их специалистов для проведения указанных проверок, получать необходимые объяснения, справки и сведения по возникающим вопросам;

- вносить в центральные органы федеральной исполнительной власти предложения и давать руководителям предприятий, объединений, организаций и гражданам, а также подразделениям местных администраций, имеющих подконтрольные Госгортехнадзору РФ объекты, обязательные для исполнения указания (предписания) об устранении выявленных нарушений условий действия разрешений (лицензий), требований (правил и норм) по безопасному ведению работ, хранению и использованию взрывчатых материалов, а также по разработке, устройству, изготовлению и безопасной эксплуатации технологических процессов и оборудования, охране недр.

Основная задача подобных органов – контролировать соблюдение требований действующего законодательства в области экологической и промышленной безопасности. На предприятиях должны находиться специально уполномоченные лица или органы, контролирующие соблюдение требований промышленной безопасности, что закрепляется законодательно.

## **Литература**

1. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.- 368 с.
2. Надежность технических систем: Справочник/Под ред. Ушакова И.А. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
3. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надёжность). - М.: Сов. радио, 1977. - 214 с.
4. Ветошкин А.Г. Надёжность технических систем и техногенный риск.- Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. - с.: ил., 24 библиогр.

5. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.
6. ГОСТ Р 51901.13-2005(МЭК 61025:1990). Анализ дерева неисправностей.

## Вопросы к экзаменационным билетам по дисциплине «Надёжность технических систем и техногенный риск»

1. Дайте определение техносфере, технике, технической системе.
2. Понятие опасности. Аксиомы потенциальной опасности технических систем.
3. Понятие качества технической системы.
4. Понятие надёжности технической системы.
5. Показатели надёжности, качества и эффективности систем.
6. В каком случае применим нормальный закон распределения?
7. Дать определение вероятности безотказной работы.
8. Перечислите основные показатели надёжности.
9. Перечислите показатели безотказности.
10. Перечислите показатели долговечности.
11. Дать определение неремонтируемого изделия.
12. Дать определение ремонтируемого изделия.
13. В каком случае применим закон распределения Пуассона?
14. В каком случае применим экспоненциальный закон распределения?
15. В каком случае применим нормальный закон распределения?
16. Дать определение интенсивности отказов.
17. Дать определение математическому ожиданию.
18. Понятие надёжности как свойства объекта.
19. Следствия основных теорем теории вероятностей. Схема Бернулли.
20. В чём общность и отличия состояний «исправность» и «работоспособность» объекта.
21. Определение предельного состояния объекта. При каких условиях оно наступает.
22. Объекты по способности к восстановлению работоспособного состояния.
23. Отказы по типу и природе происхождения.
24. Перечислите основные признаки классификации отказов.
25. Перечислите и дайте определение свойств (составляющих) надёжности.
26. Перечислите и поясните показатели долговечности.
27. Перечислите и поясните основные аксиомы вероятности.
28. Перечислите и поясните смысл основных правил (теорем) теории вероятностей.
29. Формула полной вероятности. Формула Байеса (вероятность гипотез).
30. Дать анализ кривой интенсивности отказов.
31. Дать определение статистической интенсивности отказов.
32. Дать определение среднему времени безотказной работы.
33. Дать определение средней наработке до отказа.
34. Дать понятие среднему времени жизни изделия.
35. Дать определение коэффициента оперативной готовности.
36. Дать определение безотказности.
37. Дать понятие коэффициента технического использования.
38. Уравнение связи показателей надёжности



39. Характеристики надёжности технических систем  $M_x$ ,  $D$ ,  $\sigma_x$ , мода, медиана, квантиль.
40. Выбор и обоснование показателей надёжности технических систем.
41. Распределение нормируемых показателей надёжности технических систем.
42. Показатели надёжности технической системы, состоящей из независимых элементов.
43. Дать определение сложной системе.
44. Что такое элемент сложной системы?
45. Перечислить факторы, которые отрицательно влияют на работоспособность сложной системы.
46. Дать понятие резервированию элементов системы.
47. Дать понятие системе с последовательным соединением элементов.
48. Дать понятие системе с параллельным соединением элементов.
49. Дать понятие системы с параллельно-последовательным соединением элементов.
50. Что такое холодное резервирование?
51. Что такое горячее резервирование?
52. Привести пример структурной схемы надёжности с параллельно-последовательным соединением элементов, формула надёжности.
53. Привести пример структурной схемы надёжности с поканальным резервированием, формула надёжности.
54. Привести пример структурной схемы надёжности с поэлементным резервированием, формула надёжности.
55. Критерии безопасности технических систем (вероятность безотказной работы, интенсивность риска аварийной ситуации).
56. Дать понятие безопасности системы «человек – машина» (СЧМ)
57. Дать понятие показателю восстанавливаемости системы «человек – машина» (СЧМ)
58. Дать понятие показателю надёжности деятельности оператора в системе «человек – машина» (СЧМ)
59. Основной показатель своевременности в работе оператора в системе «человек – машина» (СЧМ)
60. Показатель надёжности для систем непрерывного типа «человек – машина» (СЧМ)
61. Показатель надёжности для систем дискретного типа «человек – машина» (СЧМ)
62. Что такое потоковые графы?

63. Дать понятие дедуктивного анализа «дерева отказов».
64. Дать определение «дереву отказов».
65. Дать определение методу первичных отказов.
66. Дать определение методу вторичных отказов.
67. Дать определение методу инициированных отказов.
68. Качественная и количественная оценка «дерева отказов»
69. Аналитический вывод для простых схем дерева отказов
70. Причислить достоинства и недостатки метода «дерева отказов».
71. Понятие техногенного риска.
72. Методология анализа и оценки риска, определения
73. Математическая интерпретация риска.
74. Виды риска и основные методы его анализа.
75. Что такое идентификация опасностей?
76. Что включает в себя анализ опасностей?
77. Что такое предварительный анализ опасностей (ПАО)
78. Содержание анализа последствий отказов (АПО).
79. Классификация отказов.
80. Анализ опасностей методом потенциальных отклонений.
81. Дать определение отказу с пренебрежительно малыми последствиями.
82. Количественный анализ риска сложных систем.
83. Критерии приемлемого риска
84. Абсолютный риск, оценка приемлемого уровня абсолютного риска.
85. Понятие «управление риском», этапы управления риском.
86. Применение теории риска в технических системах.
87. Государственный надзор и контроль за промышленной безопасностью.