



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ДГТУ)**

Факультет «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология»

Кафедра «безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды»

## **НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК**

**Курс лекций**

по дисциплины

Надежность технических систем и техногенный риск

Ростов-на-Дону  
ДГТУ  
2023

## СОДЕРЖАНИЕ

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ	3
1.1 ЛЕКЦИЯ 1. ВВОДНАЯ ЛЕКЦИЯ	3
1.2-1.3 ЛЕКЦИЯ 2,3. НАДЕЖНОСТЬ – КОМПЛЕКСНОЕ СВОЙСТВО	8
1.4 ЛЕКЦИЯ 4. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ	14
1.5 ЛЕКЦИЯ 5. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ	17
1.6 ЛЕКЦИЯ 6. МОДЕЛИ ОТКАЗОВ	22
1.7 ЛЕКЦИЯ 7. ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ	25
1.8-1.9 ЛЕКЦИЯ 8,9. ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ	30
1.10 ЛЕКЦИЯ 10. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	39
1.11-1.12 ЛЕКЦИЯ 12,12. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ «ЧЕЛОВЕК-МАШИНА»	41
1.13-1.14 ЛЕКЦИЯ 13,14. ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК	50
1.15-1.17 ЛЕКЦИЯ 15,16.17. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РИСКА	61
2. ТЕМАТИКА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ	65
2.1. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ И ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ	65
2.2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ И НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ОБ ОТКАЗАХ	69
2.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ	74

# 1 КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## ЛЕКЦИЯ 1. (2 часа) Вводная лекция

### 1. Техническая система. Определение.

Нам предстоит изучать дисциплину «Надежность технических систем и техногенный риск». Она состоит из двух частей: 1. надежность технических систем и 2. техногенный риск. Что же такое техническая система? Существует классическое определение системы, основанное на переводе с греческого: система (целое, составленное из частей) – множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определенную целостность, единство.

*В теории надежности под технической системой понимают совокупность взаимодействующих и функционально взаимосвязанных частей, называемых элементами.*

Система может рассматриваться как составная часть более крупной системы, и тогда она выступает в качестве элемента. Со своей стороны, если элемент может быть разбит на составные части, он рассматривается как система.

Например, зерноуборочный комбайн состоит из нескольких агрегатов: жатка, молотилка, копнитель, двигатель, ходовая часть и др., а каждый агрегат, в свою очередь, состоит из определенных составных частей. С точки зрения теории надежности комбайн – это система, а составляющие его агрегаты – элементы. Но в тоже время каждый агрегат – система, а его составные части – элементы. В дальнейшем будем часто использовать термин «объект», понимая под ним как техническую систему, так и элемент.

### 2. Надежность. Определение.

Надежность – одно из основных свойств качества объекта. А качество объекта – совокупность свойств, обуславливающих его способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением. К таким свойствам можно отнести стабильность выполнения заданных функций, удобство в применении и обслуживании, экономическую эффективность, эстетические свойства и т. д. Особая роль принадлежит надежности.

Например, зерноуборочный комбайн. Его основные функции – скосить хлебную массу, обмолотить, выделить зерно и переместить его в некоторую емкость. При этом весь технологический процесс должен быть стабильным, т.е. уровень потерь зерна, степень дробления, засоренность не должны превышать установленных значений. Условия работы комбайнера должны быть удобными и достаточно комфортными. Используемый комбайн должен приносить прибыль.

Автомобиль предназначен для перемещения пассажиров и (или) грузов из одной точки пространства в другую с определенной скоростью. Можно назвать много свойств, которыми, на наш взгляд, должен обладать автомобиль: комфортность условий работы и отдыха водителя, комфортность пассажиров,

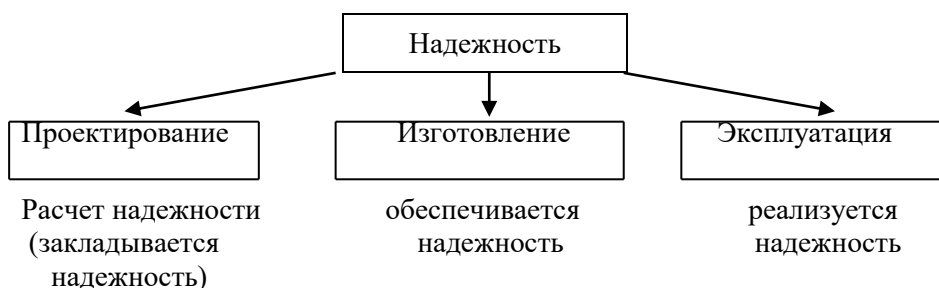
размеры легкового автомобиля (престижно иметь очень длинный легковой автомобиль), его цвет, экологичность и т.д., грузоподъемность и маневренность для грузового автомобиля, эффективность использования и т.д. Но, самое главное, в течение всего периода эксплуатации от её начала и до списания все свойства и, в первую очередь, основные функции должны сохраняться в определенных, заранее оговоренных пределах. Это и будет характеризовать надежность автомобиля.

*Надежность технической системы - это её свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.*

Из определения видно, что способность технической системы выполнять требуемые функции, т.е. её надежность оговаривается соблюдением ряда условий: работе в заданных режимах и условиях применения, проведение через определенные периоды времени установленных видов технического обслуживания, применение установленных техдокументацией методов ремонта, соблюдение правил хранения и транспортирования. И только в этом случае мы вправе ожидать, что приобретенный нами автомобиль прослужит нам верой и правдой установленный ему срок службы.

### 3.Значение проблемы надежности.

Надежность — это один из основных показателей качества изделий, проявляющийся во времени и отражающий изменения, происходящие в машине на протяжении всего времени её эксплуатации.



Увидеть и оценить надежность машины всесторонне или достаточно полно можно только в эксплуатации.

Видеть легко, трудно предвидеть. (Бенджамен Франклин).

Но создатели машины должны уметь рассчитывать и прогнозировать надежность создаваемой техники на стадии проектирования.

Чем дальше от доски конструктора обнаруживается ненадежность, тем дороже она обходится. (А.Н. Туполев)

Решение проблемы осложняется следующими факторами:

- во всех закономерностях участвует фактор времени;
- физические закономерности, определяющие изменения характеристик машин, сложны и разнообразны;
- процессы изменения параметров изделий являются случайными;

- все стадии создания и эксплуатации машин вносят свой вклад в формирование показателей надежности.

#### **4. Краткая историческая справка. Формирование науки о надежности.**

Мы должны иметь в виду, что все технические объекты (машины, приборы, инструменты, приспособления) во все времена изготавливались в расчете на некоторый достаточный для практических целей период использования.

Создатели технических устройств всегда стремились к тому, чтобы их изделия были прочными, долговечными, могли быть ремонтируемыми, а если сказать одним словом – надежными. Но долгое время надежность не могла быть оценена количественными показателями. Говорили: менее надежное изделие или более надежное, т.е. существовала качественная оценка. И только с возникновением количественных показателей начала развиваться теория надежности. Надежность стала наукой. На первых этапах развития теории основное внимание уделялось сбору и обработке статистических данных об отказах изделий. На основе анализа полученной информации можно было оценить степень надежности наблюдаемых объектов. Развитие теории сопровождалось совершенствованием вероятностных методов исследования, а именно: определение законов распределения наработки изделий до отказа, разработка методов расчета и испытаний с учетом случайного характера возникновения отказов. В это же время возникали новые направления в развитии теории:

- поиск принципиально новых путей повышения надежности;
- прогнозирование надежности;
- анализ физико-химических процессов, оказывающих влияние на надежность;
- установление количественных связей между характеристиками этих процессов и показателями надежности;
- совершенствование методов испытаний на надежность. Вначале проводились ускоренные и натурные неразрушающие испытания. Затем возникли методы математического моделирования, которые при современном уровне вычислительной техники получили широкое развитие. Можно утверждать, что к середине XX века сформировались основы общей теории надежности.

Основные факторы, определившие главные направления в развитии надежности как науки:

- возрастающая сложность технических устройств;
- возрастание ответственности функций, которые выполняют технические устройства;
- повышение требований к качеству изделий и условиям их работы;
- стремление к всё более полной автоматизации производственных и других процессов.

Техническим средствам отводят все более ответственные функции на производстве и в сфере управления. Все больше насыщение техническими устройствами окружающего мира, постоянно убыстряющийся темп жизни увеличивают зависимость человека от техники: отказ технического устройства

зачастую может привести к катастрофическим последствиям. В последние годы ученые ввели понятие «техногенная сфера», разрабатываются методы определения техногенного риска и его разновидностей.

## **5. Математические методы теории надежности.**

Надежность является прикладной наукой и поэтому как всякая прикладная отрасль знаний опирается в своем развитии на фундаментальные математические и естественные науки. В связи с тем, что количественные показатели надежности носят случайный характер, математическую основу теории надежности на начальном этапе её возникновения составляют теория вероятностей и математическая статистика. В дальнейшем получили применение аналитические методы теории случайных процессов. Расчеты надежности изделий, для которых возникает необходимость их ремонта, причем как продолжительность эксплуатации до ремонта, так и длительность ремонта носят случайный характер, подобны в ряде случаев расчету систем массового обслуживания. При анализе надежности сложных структурных систем находит применение метод логических схем с использованием алгебры логики (алгебры Буля). Возможно, мы рассмотрим пример применения этого метода. И, наконец, все более широкое применение получают методы расчета, сочетающиеся с методами математического моделирования.

## **6. Физические основы теории надежности.**

Второй составной частью фундамента науки надежности являются результаты исследования естественных наук, в первую очередь тех из них, которые изучают физико-химические процессы разрушения старения, и изменения свойств материалов из которых изготовлены технические объекты или которые необходимы для их функционирования.

Все результаты исследований этих наук, используемые в теории надежности, формируются в область знаний, объединяемую термином физика отказов. Физика отказов изучает, исследует протекающие во времени процессы, приводящие к потере материалов первоначальных свойств при эксплуатации изделий.

## **7. Экономический аспект надежности.**

При организации и проведении работ по созданию технического объекта с заданным уровнем надежности часто возникает необходимость проработки (рассмотрение, оценка) нескольких вариантов решения поставленной задачи. При этом необходимо постоянно помнить о необходимости экономической оценки каждого варианта, т.к. в большинстве случаев именно экономический аспект является основополагающим при выборе того или иного варианта. Дело в том, что современный уровень развития техники позволяет создавать объекты практически с любыми показателями надежности. Однако затраты при этом могут быть настолько высокими, а изделия будут таким дорогим, что не заинтересует не одного заказчика,

потому что экономический эффект от его применения за весь период эксплуатации не окупит расходы на его приобретение.

Отметим некоторые возможности создания изделий с требуемым уровнем надежности:

- широкий диапазон конструктивных решений;
- наличие достаточно большого разнообразия конструкционных материалов;
- использование материалов с заданными характеристиками;
- возможность выбора того или иного технологического процесса при изготовлении изделия;
- применение той или иной системы технического обслуживания и ремонта;
- и т. д.

## 1.2-1.3 ЛЕКЦИЯ 2,4. (4 часа) Надежность – комплексное свойство

### 1. Схема основных состояний и событий.

Прежде, чем приступить к изучению терминологии, используемой в науке о надежности, следует дать определения исправного и неисправного, работоспособного и неработоспособного состояний объекта. На каждое изделие машиностроительной промышленности разрабатывается нормативно-техническая документация и (или) конструкторская документация. Наиболее широкое применение имеет термин «нормативно-техническая документация» или НТД. Такую аббревиатуру будем использовать, понимая под нею то, что было выше сказано о документации на изделие. В НТД включены, кроме технической характеристики, требования к изделию, при соблюдении которых изготовитель имеет право реализовать изделие.

Рассмотрим схему основных состояний и событий.

Исправное состояние – это состояние изделия, при котором оно соответствует всем, требованиям НТД.

Неисправное состояние – это состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований НТД.

Работоспособное состояние – это состояние изделия, при котором значение всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям НТД.

Неработоспособное состояние – это состояние изделия, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям НТД.

Примеры: 1. Поцарапанный, слегка помятый автомобиль выполняет все основные функции – исправное состояние.  
2. Мощность двигателя автомобиля ниже установленной НТД – неработоспособное состояние.

Предельное состояние – состояние изделия, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

События. (см. рис.1)

Повреждение – событие, заключающее в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния – 1.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния - 2.

Переход изделия в предельное состояние из-за неустранимого нарушения требований безопасности, снижения эффективности эксплуатации, морального старения и т.д. - 3.

Восстановление исправного или работоспособного состояния – 4.

Ремонт изделия, достигшего предельного состояния – 5.



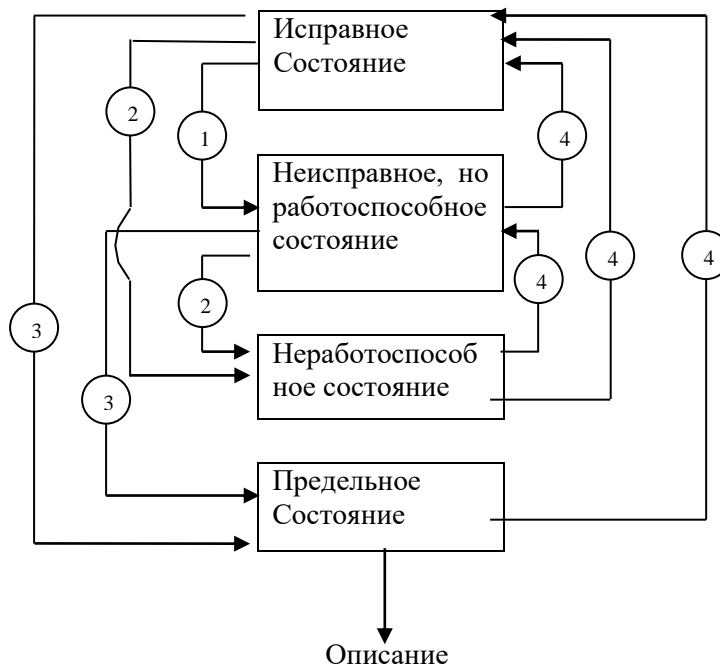
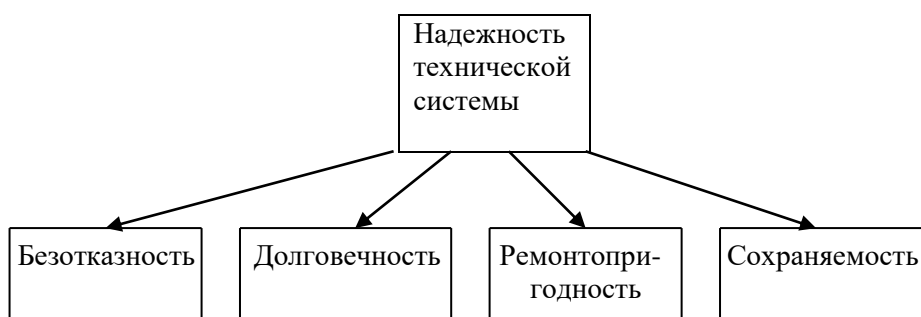


Рис. 1. Схема основных состояний и событий.

## 2. Надежность – комплексное свойство технической системы.

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

Надежность является сложным, комплексным свойством, которое в зависимости от назначения и условий применения объекта может характеризоваться одним или сочетанием двух и более свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости.



Безотказность – свойство технической системы сохранять непрерывно работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Под наработкой понимается продолжительность или объем работы. Измеряется наработка в основном, в единицах времени. Но может и в единицах, характеризующих объем выполняемой работы.

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

Ремонтпригодность – свойство технической системы, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения

отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость – свойство технической системы сохранять значения показателей безотказности, долговечности, ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортирования.

По каждому свойству высказать несколько поясняющих предложений: подчеркнуть непрерывность работоспособного состояния, выполнение требований по соблюдению ТО – и ремонтов, быстрого обнаружения причин возникновения отказов и т. д.

### 3. Показатели надежности.

3.1. Безотказность – свойство технической системы непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Под наработкой принять продолжительность или объем работы изделия. Нарботка измеряется в единицах времени или в единицах, характеризующих объем выполняемой работы. Если представить процесс эксплуатации технического изделия на оси  $t$  (см. рис.2), то тогда  $t_i$  – наработка до первого отказа ( $t_1$ ) и (или) между отказами, а  $t_{Bi}$  – время восстановления работоспособного состояния.

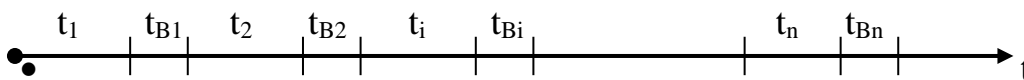


Рис. 2

Основными показателями безотказности являются вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Обозначение вероятности безотказной работы в самом общем виде  $P(t)$ . Вероятность отказа –  $F(t) = 1 - P(t)$ .

Когда указывают конкретный интервал времени или объем наработки, то пишут  $P(t=t_0)$ , что означает вероятность безотказной работы в интервале от 0 до  $t_0$ . Используются также следующие показатели: средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа; средняя наработка на отказ – отношение наработки восстанавливаемого изделия к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Обозначают буквой  $T$ . При обработке статистической информации получают оценку средней наработки на отказ, и тогда применяют обозначение  $\bar{T}$ . Для приведенного примера

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \text{ где } \sum_{i=1}^n t_i - \text{наработка изделия;}$$

$n$  – число отказов за время этой наработки.

Остановимся еще на следующих показателях безотказности: гамма – процентная наработка, параметр потока отказов, интенсивность отказов.

Гамма – процентная наработка – наработка, в течение которой отказ изделия не возникнет с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Так, например, если говорят, что  $\gamma = 90\%$  – наработка подшипников 1000 часов, то  $N$

= 100 из подшипников, поставленных на испытание, после наработки в 1000 час может отказать не более 10 подшипников, т.е. сохранить работоспособное состояние должны не менее 90 подшипников.

Параметр потока отказов – отношение среднего числа отказов восстанавливаемого изделия за произвольно малую его наработку к значению этой наработки. Если за наработку  $\Delta t = 200$  час. изделие имело  $n = 3$  отказов, то параметр потока отказов определится так  $W(t) = \frac{n}{\Delta t} = \frac{3}{200} = 0,015 \text{ час}^{-1}$

Теоретически это выражается формулой:

$$\omega(t) = \frac{M(n(t + \Delta t)) - M(n(t))}{N \cdot \Delta t},$$

где  $M(n(t + \Delta t))$  – математическое ожидание  $M$  числа отказов  $n$  на интервале времени продолжительностью  $t + \Delta t$ ;

$M(n(t))$  – математическое ожидание числа отказов на интервале времени продолжительностью  $t$ .

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник,

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{P'(t)}{P(t)} = \frac{F'(t)}{1 - F(t)};$$

где  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов;  
 $f(t)$  – плотность вероятности отказов;  
 $P(t)$  – вероятность безотказной работы.

При определении интенсивности отказов по статистическим данным используют формулу:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \cdot \Delta t};$$

где  $\bar{\lambda}(t)$  – оценка интенсивности отказов;

$n(\Delta t)$  число отказавших объектов  $n$  в интервале времени  $(\Delta t)$ ;

$N_{cp}$  – среднее число изделий, являющихся работоспособными в данный интервал времени  $\Delta t$ .

$$N_{cp} = \frac{N_{i-1} + N_i}{2};$$

где  $N_{i-1}, N_i$  – число работоспособных изделий на начало и конец отрезка времени соответственно.

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

Прежде чем назвать показатели долговечности введем термины: технический ресурс – наработка изделия от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние. Срок службы – календарная продолжительность от начала эксплуатации изделия или её возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

Из показателей долговечности остановимся на следующих:

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.

Назначенный ресурс – суммарная наработка изделия, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено.

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

Назначенный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации изделия, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено.

В отношении перечисленных показателей следует отметить, что при их применении следует указывать вид действий после наступления предельного состояния. Например, средний ресурс до капитального ремонта, полный средний ресурс (срок службы), полный назначенный ресурс (срок службы). Употребление термина «полный» означает, что изделие подлежит окончательному снятию с эксплуатации.

3.3. Ремонтопригодность – свойство технической системы, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Основным понятием, используемым при рассмотрении вопросов, связанных с ремонтопригодностью изделия, является время восстановления работоспособного состояния. Под ним понимают продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта. К операциям восстановления относятся: определение места и характера отказа, замена, ремонт, регулирование, контроль состояния элементов изделий и изделия в целом.

Основными показателями ремонтопригодности являются следующие.

Вероятность восстановления работоспособного состояния – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния изделия не превысит заданного.

Среднее время восстановления работоспособного состояния – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния. Оценку среднего времени восстановления определяют по формуле:

$$\bar{T}_B = \frac{\sum t_{Bi}}{n}.$$

При решении экономических вопросов используют в качестве показателя среднюю трудоемкость восстановления работоспособного состояния.

3.4. Сохраняемость – свойство технической системы сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения и транспортирования изделия в установленных пределах.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

3.5. Комплексные показатели надежности.

Рассмотренные выше показатели надежности: вероятность безотказной работы, наработка на отказ, средний ресурс и т.д. – являются единичными показателями надежности, т.к. характеризуют только одно свойство. Теперь мы

рассмотрим комплексные показатели надежности, т.е. те, которые характеризуют более одного свойства.

Коэффициент готовности – вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объектов по назначению не предусматривается.

Коэффициент готовности ( $K_r$ ) характеризует количественно два свойства надежности: безотказность и ремонтпригодность. Стационарное значение коэффициента готовности определяют по формуле:

$$K_r = \frac{T}{T + T_B},$$

где  $T$  – наработка на отказ;

$T_B$  – среднее время восстановления.

Формула может быть представлена  $K_r = \frac{\sum t_i}{\sum t_i + \sum t_{Bi}}$ .

Как видно из определения, коэффициент готовности характеризует готовность изделия к применению по назначению только в отношении его работоспособности, т.е. речь идет о вероятности застать изделие в работоспособном состоянии в любой момент времени, причем этот момент выбирается в тех интервалах времени, когда изделие должно выполнять заданные функции.

Коэффициент технического использования – отношение математического ожидания времени пребывания изделия в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий интервалов времени пребывания изделия в работоспособном состоянии, простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и ремонтов за тот же период эксплуатации.

$$K_{ТИ} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{Bi} + t_{TO}},$$

где  $t_{TO}$  – суммарная продолжительность простоев изделия на проведение технического обслуживания в течение заданного обслуживания в течение заданного периода эксплуатации.

Следует отметить, что для оценки коэффициента технического использования должен выбираться такой период эксплуатации, который содержит все виды технического обслуживания и ремонтов.

## 1.4 ЛЕКЦИЯ 4. (2 часа). Классификация отказов

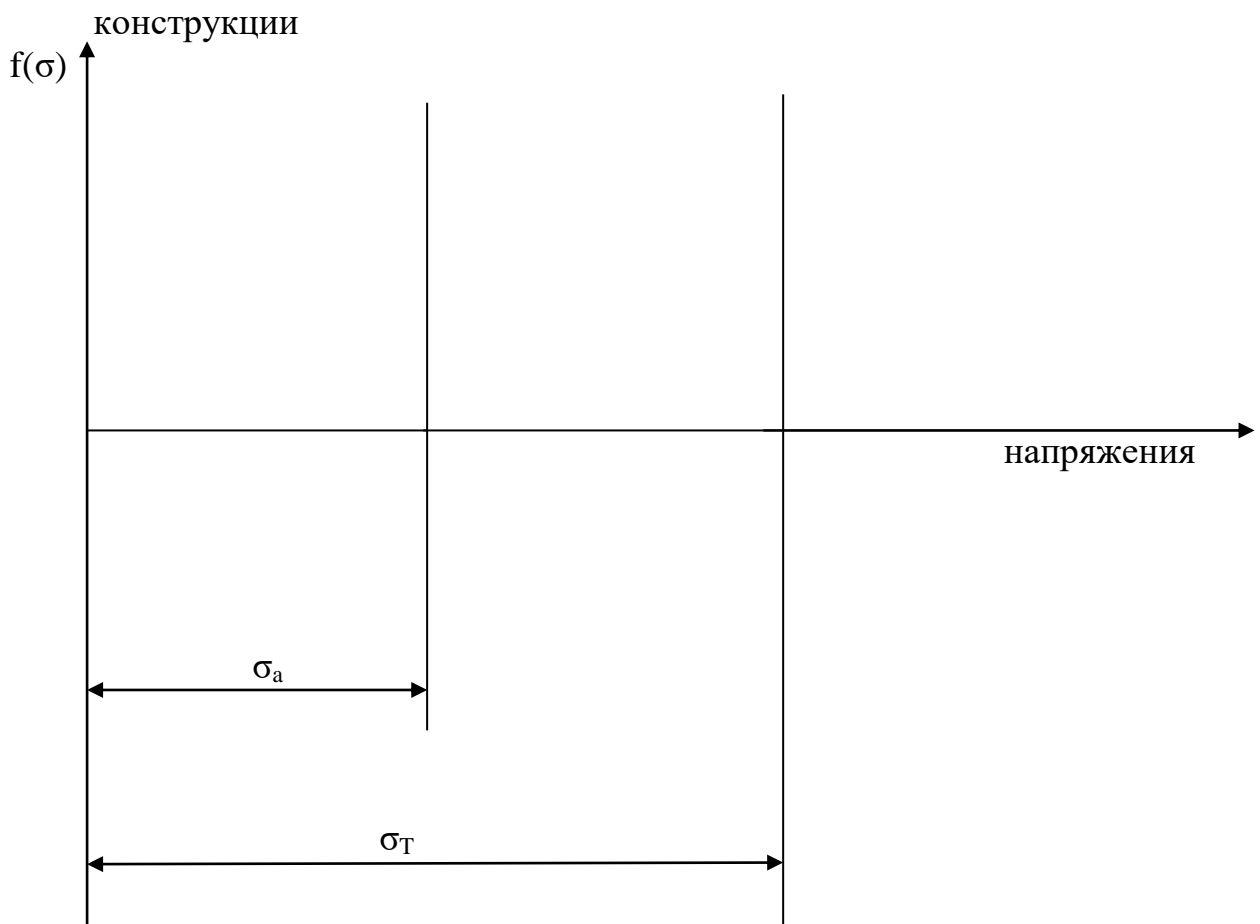
### 4.1. Внезапные и постепенные отказы

**Внезапный отказ** — отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта. Внезапные отказы возникают в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, превышающих возможности объекта к их восприятию.

Пример возникновения внезапного отказа

Плотность распределения  
фактических напряжений  
конструкции

Плотность распределения  
напряжений металла



зона возможного  
возникновения  
внезапного отказа

$$\sigma_a \leq \frac{\sigma_T}{[n]},$$

$\sigma_a$  - математическое ожидание нормальных напряжений возникающих при эксплуатации конкретной детали.

$\sigma_T$  - математическое ожидание предела текучести материала, из которого изготовлена деталь.

$[n]$  - допускаемый коэффициент запаса.

Наработка до отказа является величиной случайной. Основным признаком внезапного отказа является независимость вероятности его возникновения от продолжительности предыдущего периода эксплуатации, т.е.  $F(t_1-t_2)$  не зависит от продолжительности  $t_1$ . И поэтому прогнозировать момент возникновения внезапного отказа практически невозможно. В ряде случаев при более глубоком проникновении в сущность процессов, связанных с возникновением отказа, может возникнуть возможность обнаружения постепенных изменений в объекте, которые приведут к постепенному отказу. И тогда можно говорить **о прогнозировании**.

Примеры:

1. Прокол камеры автомобильного колеса при наезде на острые предметы.
2. Излом оси колеса при попадании в яму.

**Постепенный отказ** – отказ, характеризующийся постепенным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта и выходом их за пределы, установленные НТД.

Постепенные отказы являются результатом того или иного процесса старения материала, ухудшающего начальные параметры объекта. К процессам старения относят износ, коррозию, усталость, изменение структуры композитных материалов и т.д.

Примеры:

1. Износ поршневой пары ДВС → увеличение зазоров между поршнем и цилиндром → снижение мощности двигателя ниже установленного значения.
2. Оси вагонов. Усталостное разрушение. До того, как было изучено явление усталости металла, такие отказы относили к внезапным.
3. Износы подшипников → повышенные зазоры в сопряжениях → перекосы валов → их поломка.
4. Старение изделий из композиционных материалов. Уплотнители в бытовых холодильниках, приводные ремни в с.-х. машинах, различные уплотнительные кольца, прокладки, манжеты сантехарматуры.

Признаком постепенного отказа является зависимость вероятности его возникновения  $t_1-t_2$  от продолжительности предыдущей эксплуатации, т.е.  $F(t_1-t_2)$  зависит от  $t_1$ . Чем глубже изучен тот или иной процесс старения, тем с большей точностью можно прогнозировать момент возникновения отказа и своевременно принимать профилактические меры. Большая часть отказов технических систем относится к постепенным отказам.

Если эксплуатационник игнорирует процессы старения, не проводит диагностирования, не выполняет профилактических работ, то появление отказов неизбежно. Характер их проявления внезапен.

#### 4.2. Зависимый и независимый отказ

**Независимый отказ** – отказ объекта, не обусловленный отказом другого объекта.

**Зависимый отказ** – отказ объекта, обусловленный отказом другого объекта.

Если в технической системе происходит отказ элемента, зависящий от отказа другого элемента этой системы, то эти элементы рассматриваются как самостоятельные объекты.

#### 4.3. Конструкционный, производственный и эксплуатационный отказы

**Конструкционный отказ** – отказ, возникший в результате несовершенства или нарушения установленных правил и норм конструирования объекта.

**Производственный отказ** – отказ, возникший в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления объекта.

- применение другого материала с более низкими физико-механическими свойствами;
- применение техпроцессов, приводящих к снижению физико-механических свойств материалов;
- отказ от отдельных элементов техпроцесса.

**Эксплуатационный отказ** – отказ, возникший в результате нарушения установленных правил и условий эксплуатации и ремонта.

#### 4.4. Отказы функционирования и параметрические

При отказе **функционирования** объект прекращает выполнять свои функции. Отказ происходит в результате поломки, деформации, заклинивания и т.д.

**Параметрический отказ** определяется выходом одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, за установленные пределы.

- Примеры:
1. Падение мощности двигателя ниже установленного предела.
  2. Повышенный расход топлива.
  3. Величина зазора в сопряжении вышла за установленные пределы.

Параметрические отказы фиксируются при проведении диагностирования. В случае обнаружения отказа должны быть приняты необходимые меры. В противном случае такой отказ может привести к отказу функционирования.



## 1.5 ЛЕКЦИЯ 5. (2 часа). Законы распределения, применяемые в теории надежности

### 1. Случайный характер показателей надежности.

Прежде дадим краткое определение терминам «невосстанавливаемые» и «восстанавливаемые» изделия:

**1.1. Невосстанавливаемые** (неремонтируемые) – изделия, которые в процессе эксплуатации не могут иметь более одного отказа, то есть при возникновении отказа их эксплуатация прекращается, так как восстановление их работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Например, лампы накаливания, шарико-, роликоподшипники, различного типа предохранители.

**1.2. Восстанавливаемые** (ремонтируемые) изделия - изделия, которые в процессе эксплуатации могут иметь более одного отказа. Примеры: автомобили, тракторы, телевизоры, зерноуборочные комбайны и т.д.

Мы уже отмечали, что одной из основных характеристик технического изделия является наработка. Она может быть величиной заданной (неслучайной) и случайной. Для невосстанавливаемого изделия наработка до отказа есть величина случайная. Для восстанавливаемого изделия случайный характер носит наработка до первого отказа, между двумя соседними отказами.

Если мы наблюдаем за партией невосстанавливаемых изделий в течение заданной продолжительности их эксплуатации, то число отказавших изделий за этот период будет величиной случайной. Также случайный характер носит число отказов восстанавливаемого изделия в течение заданной наработки.

Из приведенных выше примеров видно, что в теории надежности рассматриваются как *дискретные* случайные величины (число отказавших изделий, число отказов), так и *непрерывные* (наработка до отказа, между отказами). Если мы рассмотрим время восстановления, то окажется, что она является величиной случайной и непрерывной.

## 2. Основные законы распределения

Таким образом мы имеем определенный набор случайных величин, и каждая из них имеет свое распределение вероятностей. Мы знаем, что всякое соотношение, устанавливающее связь между случайной величиной и соответствующим ей значением вероятности, называют *законом распределения*. В теории вероятностей разработан ряд таких законов. Некоторые из них нашли широкое применение в теории надежности. Для непрерывных случайных величин используют нормальный, экспоненциальный, Вейбулла, логарифмически-нормальный и др., для дискретных случайных величин наиболее часто применяют распределения Пуассона и биномиальное. В дальнейшем рассмотрим законы нормальный, экспоненциальный и Пуассона.

### 3. Нормальный закон (закон Гаусса)

#### 3.1. Область применения:

- Суммарная наработка восстанавливаемого изделия до предельного состояния или капитального ремонта в ряде случаев приближенно описывается нормальным распределением. Точного соответствия не может быть, так как наработка является положительной величиной, а нормальное распределение имеет дело с отрицательными и положительными свойствами. Однако, если коэффициент вариации  $V < 1/3$ , то погрешность незначительна.
- Время восстановления часто описывается нормальным распределением.
- Нарботка до отказа невосстанавливаемого изделия иногда распределена нормально.
- Нормальное распределение используется при приближенных расчетах, когда имеют место биномиальное распределение или распределение Пуассона.

#### 3.2. Основные характеристики:

Функция распределения

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx,$$

$a$  – математическое ожидание,

$x$  – текущее значение случайной величины,

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение.

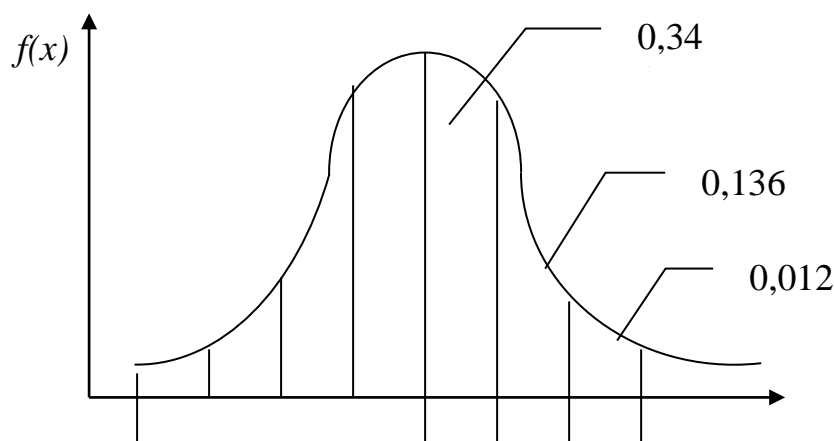
Вероятность безотказной работы

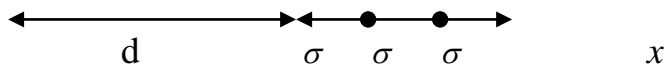
$$P(x) = 1 - F(x)$$

Плотность распределения  $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$

Коэффициент вариации  $V = \frac{\sigma}{a}$

Следует отметить, что для нормально распределенной случайной величины все рассеивание с точностью долей процентов укладывается на участке  $a \pm 3\sigma$





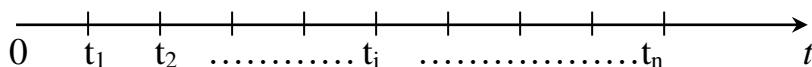
#### 4. Экспоненциальный закон распределения

##### 4.1. Область применения:

- Нарботка до отказа многих невосстанавливаемых изделий (элементов системы) описывается экспоненциальным распределением.
- Поток отказов у восстанавливаемых изделий часто является простейшим (после приработки). В этом случае наработка на отказ имеет экспоненциальное распределение.
- В ряде случаев принимают, что время восстановления распределено по экспоненте.

Что такое поток отказов?

Если на оси  $t$  откладывать, начиная от момента ввода изделия в эксплуатацию ( $t=0$ ), моменты отказов и считать, что восстановление работоспособного состояния происходит мгновенно, то последовательный ряд точек, определяющих моменты отказов, и есть поток отказов.



$t_1$  – наработка до отказа,

$t_2$  – наработка на отказ.

Поток называется простейшим, если соблюдаются 3 условия: стационарность, без последствие, ординарность.

Стационарность характеризуется тем, что вероятность возникновения того или иного числа отказов на участке времени  $\tau$  зависит только от длины участка и не зависит от его местоположения на оси  $t$ .

Без последствие заключается в том, что для любых не перекрывающихся участков число отказов, возникающих на одном из них, не зависит от числа отказов, возникающих на других участках.

Ординарность характеризуется тем, что вероятность возникновения на элементарном участке  $\Delta t$  двух и более отказов пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью возникновения одного отказа.

Такой поток называют еще пуассоновским, потому что число отказов на любом фиксированном интервале времени распределено по закону Пуассона.

##### 4.1. Основные характеристики:

Функция распределенная

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

где  $t$  - текущее значение времени,

$\lambda$  - интенсивность отказов.

Вероятность безотказной работы

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

Плотность распределения

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

Математическое ожидание

$$T = \frac{1}{\lambda}$$

Поэтому функция распределения может иметь вид

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}$$

Дисперсия

$$D = \frac{1}{\lambda^2} = T^2 \rightarrow \sigma = \frac{1}{\lambda} = T$$

Коэффициент вариации

$$V = \frac{\sigma}{T} = 1$$

## 5. Закон Пуассона

### 5.1. Область применения:

- Если у восстанавливаемого объекта поток отказов простейший, то случайное число отказов изделия в течение фиксированной наработки имеет распределение Пуассона.
- Случайное число отказов восстанавливаемого изделия в течение периода приработка приблизительно подчиняется распределению Пуассона.
- В ряде случаев распределение Пуассона применяется как удобное приближение к биномиальному распределению. А, как известно, случайное число отказавших невосстанавливаемых изделий в течение фиксированной наработки имеет биномиальное распределение.

### 5.2. Характеристики закона Пуассона.

Закон Пуассона применяется для определения вероятностей появления случайной величины, которая может принимать только целые положительные значения. Итак, случайная величина, принимающая целые положительные значения от 0 до  $n$ , распределена по закону Пуассона, если вероятность того, что она примет значение  $m$  определяется по формуле:

$$p(m) = \frac{1}{m!} a^m e^{-a},$$

где  $a$  – параметр распределения,

математическое ожидание –  $a$ ,

дисперсия  $D = a$ ,

среднеквадратическое отклонение  $\sigma = \sqrt{a}$ ,

коэффициент вариации  $V = \frac{1}{\sqrt{a}}$ .

Имеется несколько случаев применения закона Пуассона на практике. Отметим два из них.

### Случай 1.

Имеется  $n$  однородных невосстанавливаемых изделий, одновременно работающих в течение времени  $t$ . Нарботка до отказа у этих изделий распределена по экспоненциальному закону с интенсивностью отказов  $\lambda$ . При этих условиях случайное число  $m$  отказавших изделий за время  $t$  распределено по закону Пуассона с параметром

$$a = n\lambda t$$

### Случай 2.

Имеется восстанавливаемое изделие, у которого поток отказов простейший (после периода приработки). Промежутки времени между последовательными отказами имеют экспоненциальное распределение. Нарботка изделия на отказ равна  $T$ . При этих условиях случайное число  $m$  отказов за время  $t$ , распределено по закону Пуассона с параметром

$$a = \frac{t}{T}$$

## 1.6 ЛЕКЦИЯ 6. (2 часа). Модели отказов

**Моделирование** – исследование объектов познания на их моделях: построение и изучение моделей реально существующих предметов и явлений и конструируемых объектов.

**Математическая модель** – приближенное описание какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженное с помощью математической символики.

### 1. Формирование модели постепенного отказа

Изменение свойств и состояния материалов является первопричиной потери объектом работоспособности, первопричиной отказа. Дело в том, что все изменения свойств и состояний материалов, протекающие во времени, приводят к ухудшению значений параметров, характеризующих работоспособное состояние объекта.

Очевидно, что чем лучше изучены процессы поведения материалов, тем глубже знания о физико-химических процессах, приводящих к изменениям их свойств, тем достовернее можно судить о времени наступления предельного состояния объекта, о вероятности возникновения отказа.

Поэтому, хотя мы и говорим, что для оценки надежности используются вероятностные характеристики, получаемые на основе статистических исследований, изучение поведения материалов, изменения их свойств в процессе эксплуатации изделия очень важно.

Конечно, следует иметь в виду, что сами физико-химические закономерности приобретают вероятностный характер, потому что факторы, влияющие на указанные процессы весьма разнообразны и переменны. Рассмотрим выражение

$$\frac{dU}{dt} = \varphi(Z_1, Z_2, \dots, Z_n : t)$$

$\frac{dU}{dt}$  - скорость протекания некоторого процесса поведения материала;

$Z_i$  – входные параметры, характеризующие условия эксплуатации (нагрузки, скорости, температуры и т.д.), состояние материала (твердость, прочность, качество поверхности и т.д.) и др. факторы, влияющие на протекание рассматриваемого процесса.

Если удастся получить функциональную зависимость, следует иметь в виду, что точно предсказать протекание процесса не удастся, т.к. сами аргументы  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  являются величинами случайными.

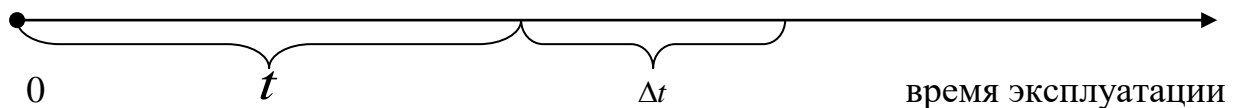
Невозможно предсказать колебания нагрузок, температур, атмосферных воздействий и т.д. Сами детали выполняются с различными допусками на технологические параметры и т.д. Механические характеристики материалов имеют разброс и т.д.

Вывод. Знание физических закономерностей протекания процесса значительно увеличивает возможности по оценке хода процесса по сравнению с оценкой только на основе статистических данных.

Таким образом, приведенное в начале лекции выражение можно считать моделью постепенного отказа.

## 2. Формирование модели внезапного отказа

Рассмотрим ситуацию.



Проводим наблюдение за эксплуатацией технического изделия и фиксируем следующие события.

$A$  – случайное событие, заключающееся в отсутствии отказа на участке  $t$ ;

$B/A$  – случайное событие, заключающееся в отсутствии отказа на участке  $\Delta t$  при условии, что на участке  $t$  отказа не было;

$AB$  – случайное событие, заключающееся в отсутствии отказа на участке  $t+\Delta t$ .

$P(A) \equiv P(t)$  – вероятность безотказной работы на участке  $t$ .

$P(B/A) \equiv P(\Delta t/t)$  – условная вероятность безотказной работы на участке  $\Delta t$  при условии отсутствия отказа на участке  $t$ ;

$P(AB) \equiv P(t+\Delta t)$  – вероятность безотказной работы на участке  $t+\Delta t$ .

Из теории вероятностей –  $P(AB) = P(A) \cdot P(B/A)$ .

Таким образом,  $P(t+\Delta t) = P(t) \cdot P(\Delta t/t)$

Известно, что интенсивность отказов  $\lambda(t)$  определяется по формуле:

$$\lambda(t) = \frac{F(\Delta t/t)}{\Delta t}$$

где  $F(\Delta t/t)$  – условная вероятность отказа на участке  $\Delta t$  (при отсутствии отказа на участке  $t$ ).

Т.к.  $P(\Delta t/t) + F(\Delta t/t) = 1$ ,

то

$$\lambda(t) = \frac{1 - P(\Delta t/t)}{\Delta t} = \frac{1 - \frac{P(t+\Delta t)}{P(t)}}{\Delta t} = \frac{P(t) - P(t+\Delta t)}{\Delta t \cdot P(t)} = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\Delta t}$$

$$\text{Рассмотрим } \lambda(t) = \lim \left( -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\Delta t} \right),$$

где  $P(t+\Delta t) - P(t)$  – приращение функции  $P(t)$ ,

$\Delta t$  – приращение аргумента.

$$\text{Таким образом, } \lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{d(P(t))}{dt} = -\frac{d}{dt} \ln P(t)$$

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

$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$  - это выражение, определяемое в теории надежности законом надежности, можно трактовать как модель внезапного отказа.



## 1.7 ЛЕКЦИЯ 7. (2 часа). Испытания на надежность

### 1. Цель и задачи испытаний на надежность.

**Цель** – определить уровень надежности проектируемой технической системы, т.е. значения показателей достаточно полна характеризующих надежность объекта.

**Задачи:**

- установление степени соответствия достигнутого уровня надежности требуемому;
- выявление «слабых» мест конструкции и разработка мероприятий по повышению надежности;
- внедрение оптимальной системы ТО и ремонта;
- определение эффективности и экономической целесообразности дальнейшей эксплуатации объекта;
- проверка правильности использованных методик при проведении расчетов и прогнозировании надежности.

### 2. Возможные результаты испытаний.

Испытания на надежность – весьма трудоемкое, длительное во времени и поэтому весьма дорогое мероприятие.

При проведении испытаний необходимо добиться требуемой достоверности получаемых результатов, что заставляет увеличивать объем выборки объектов, продолжительность испытаний и т.д.

Рассмотрим четыре возможных исхода испытаний.

**2.1.** Определены законы распределения наработки на отказ, времени восстановления работоспособного состояния объекта и его элементов с учетом условий эксплуатации и режимов работы.

**Пример.** На испытание поставлено  $N$  однотипных невосстанавливаемых элементов, и все они отказали за установленное время испытаний.

В таком случае наработка до отказа определяется по формуле:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N},$$

где  $t_i$  – наработка  $i$ -го элемента до отказа.

Используя известные методы обработки статистического материала, можно определить закон распределения.

При этом следует иметь в виду, что полученные результаты могут оказаться практически ненужными, потому что изделие к моменту окончания испытаний будет снято с производства. Но при разработке аналогичных изделий накопленная информация может оказаться полезной.

**2.2.** Определены отдельные показатели надежности за ограниченный период испытаний, например, за гарантийный срок эксплуатации. Так, для комбайнов «Дон - 1500» в конце 80-х – начале 90-х г.г. прошлого века определяли наработку на отказ в течение первых 2-х лет эксплуатации и добились значения  $T=100$  час.

Если известно, что для испытываемого объекта применим экспоненциальный закон распределения наработки до отказа, то для ее определения при незавершенных испытаниях используют формулу

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} + \frac{N-n}{N} \cdot T_u,$$

где  $N$  – объем выборки

$n$  – количество отказавших объектов

$T_u$  – продолжительность испытаний.

**2.3.** Временные показатели не могут быть определены. Но для каждого выходного параметра определяется запас надежности. В сочетании с методами прогнозирования эти результаты могут быть использованы для определения уровня надежности с невысокой степенью достоверности.

**2.4.** Определить уровень надежности невозможно в абсолютных значениях. Можно говорить о сравнении уровней надежности.

### **3. Классификация испытаний.**

#### **3.1. Классификация по назначению:**

- исследовательские – проводятся для изучения факторов, влияющих на надежность;
- контрольные – проводятся для контроля уровня надежности, выявления его соответствия установленному НТД уровню надежности;
- сравнительные – для аналогичных или одинаковых объектов, проводятся в идентичных условиях для сравнения их уровней надежности;
- определительные – проводятся для определения показателей надежности с заданным уровнем достоверности.

#### **3.2. Классификация по уровню проведения испытаний:**

- государственные;
- межведомственные;
- ведомственные.

### 3.3. Классификация по условиям и месту проведения испытаний:

- лабораторные – испытания объекта, проводимые в лабораторных условиях;
- стендовые – испытания объекта, проводимые на испытательном оборудовании;
- полигонные – испытания объекта, проводимые на испытательном полигоне;
- натурные – испытания объекта, проводимые в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению с непосредственным оцениванием или контролем уровня надежности;
- эксплуатационные – испытания объекта, проводимые при эксплуатации.

### 3.4. Классификация по продолжительности испытаний:

- нормальные – испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о надежности объекта в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиях эксплуатации;
- ускоренные – испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о надежности объекта в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях;
- сокращенные – испытания, проводимые по сокращенной программе.

## 4. Объекты испытаний.

**Образцы** – исследуются свойства материалов, определяющих свойства надежности элементов.

**Детали, сопряжения, кинематические пары** – исследуется степень влияния конструктивных и технологических факторов на срок службы или ресурс.

**Сборочные единицы** – определяется взаимодействие отдельных механизмов и элементов конструкции и их влияние на показатели работоспособности.

**Машина** – выявляется влияние на надежность машины характера взаимодействия всех механизмов и сборочных единиц, условий эксплуатации, режимов работы.

**Система машин** – оценивается взаимодействие машин, связанных в единый производственный комплекс для выполнения общей задачи, и надежность такой системы.

## 5. Планирование испытаний.

При планировании испытаний на надежность учитывается тип объекта: невосстанавливаемый, восстанавливаемый. Для невосстанавливаемых объектов предусматривается два варианта проведения испытаний:

- отказавшие объекты не заменяются;
- отказавшие объекты заменяются.

Продолжительность испытаний ограничивается либо наработкой, либо количеством отказавших элементов. В таблице приведены варианты планов испытаний.

Таблица

**Варианты планов испытаний**

Характеристика объекта	U	R	M
Продолжительность испытаний			
T	NUT	NRT	NMT
r	NUr	NRr	NMr
T, r	NU(T,r)	NR(T,r)	NM(T,r)

Буквы в планах испытаний означают следующее:

N – количество одновременно испытываемых объектов;

U – невосстанавливаемые и незаменяемые в случае отказа объекты;

R – невосстанавливаемые и заменяемые в случае отказа объекты;

M – восстанавливаемые объекты;

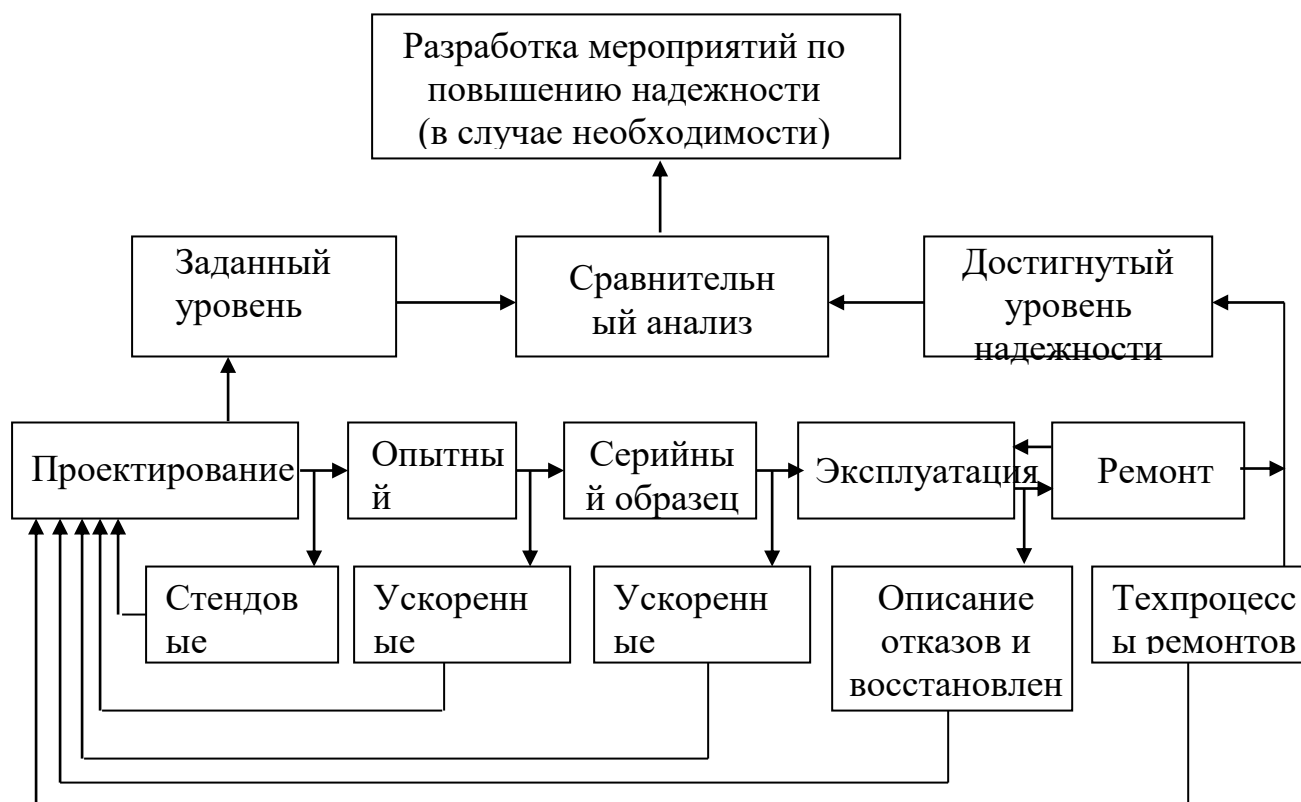
T – наработка, при достижении которой испытания прекращаются;

r – количество отказов, при достижении которого испытания прекращаются.

Если в графе «продолжительность испытаний» стоит «T,r», то испытания прекращаются при достижении либо T, либо r.

Для каждого плана испытаний разработаны методики проведения испытаний и обработки полученной информации.

**6. Примерная схема проектирования машины с заданным уровнем надежности.**



## **1.8-1.9 ЛЕКЦИЯ 8,9. (4 часа). Обзор методов расчета надежности**

### **1. Прогнозирование надежности – расчет на стадии проектирования**

Для сложной технической системы рассматривают три основных стадии ее существования: проектирование, изготовление, эксплуатация. На стадии проектирования надежность закладывается, при изготовлении – осуществляется, в эксплуатации – реализуется. Чем дальше от проектирования выявляется ненадежность, тем больший ущерб наносится в результате отказа. Ущерб может быть материальным, но все чаще имеют место травмы и даже гибель людей. В последние десятилетия возросло количество человеческих жертв в результате катастроф, связанных с отказами технических систем. Это обусловлено насыщением среды обитания сложными, энергоемкими машинами. Мы живем в техногенной сфере. Тем самым очевидна необходимость уделять первостепенное внимание вопросам создания надежной техники. Создание абсолютно надежной техники невозможно.

Анализ проблем, решаемых в теории надежности, показывает, что все методы расчета надежности разработаны для стадии проектирования изделия. Для реализации этих методов формируются сложные структурные схемы, деревья отказов, событий и т.д., выполняются очень сложные расчеты при удовлетворительной достоверности получаемых результатов. Но все это при условии, что проектировщики обладают знаниями о надежности составляющих сложные технические системы элементов. До сих пор определение уровня надежности некоторых элементов в ряде случаев затруднительно. Проводятся сотни экспериментов, и нет конца решению этих проблем. Рекомендации и требования, закладываемые в нормативно-техническую документацию на изготовление и эксплуатацию изделия, также разрабатываются на стадии проектирования.

Поэтому мы рассмотрим некоторые аспекты проблемы надежности на стадии проектирования, познакомимся с некоторыми методами расчета надежности, рассмотрим ряд примеров.

### **2. Алгоритм расчета надежности.**

#### **2.1. Формирование понятия отказа.**

Четкое формирование понятия отказа позволяет ограничивать количество элементов, которые должны учитываться при расчете надежности. Особое внимание уделяется элементам, подверженным износу и другим процессам старения. Кроме того, следует дать полную характеристику параметрическим отказам. На этом этапе определяется номенклатура элементов, для которых рассчитываются показатели надежности. Очевидно, что станины технического оборудования, различные защитные кожухи, рамы и т.д. могут быть исключены из рассматриваемой номенклатуры.

#### **2.2. Составление структурной схемы расчета надежности.**

В сложной технической системе (автомобиль, станок, трактор и т.д.) выделяются агрегаты (блоки), выполняющие самостоятельные функции (двигатель, трансмиссии, системы управления и т.д.). Здесь бывает

целесообразно выделять и группировать в отдельные системы однотипные элементы (например, подшипники или элементы гидросистемы). На схеме указывается продолжительность и режим работы каждого элемента. Здесь же формируется номенклатура показателей надежности, которые должны определяться на этапе проектирования. Это могут быть:  $P(t)$ ,  $T$ ,  $K_G$ , и т.д.

### 2.3. Выбор методики расчета.

На данном этапе наиболее важным является выбор расчетных формул и численных значений определяемых показателей надежности. Наиболее часто используемый показатель – интенсивность отказов  $\lambda$ , который является параметром основного закона надежности

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

В том случае, если элемент в различные периоды эксплуатации имеет различные значения  $\lambda$  интенсивности отказов, то для расчетов используют эквивалентную интенсивность отказов.

Период времени  $t_1$ , интенсивность  $\lambda_1$ ,

период времени  $t_2$ , интенсивность  $\lambda_2$ ,

период времени  $t_i$ , интенсивность  $\lambda_i$ ,

период времени  $t_n$ , интенсивность  $\lambda_n$ .

Тогда эквивалентная интенсивность  $\lambda_{\text{экв}}$  будет равна:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\sum \lambda_i t_i}{\sum t_i}$$

В ряде случаев предпочтение отдают вероятности безотказной работы  $P(t)$ , но, зная  $\lambda(t)$  и  $F(t)$ , получим

$$P(t) = 1 - F(t)$$

Знание  $\lambda(t)$  позволяет определить остальные показатели надежности.

### 3. Определение вероятности безотказной работы технической системы при основном соединении элементов.

Если отказ технической системы наступает при отказе одного из ее элементов, то такая техническая система имеет **основное соединение элементов**.

Например,



Система состоит из четырех элементов, и, если отказ любого из них означает отказ системы, то такое соединение – основное (последовательное). При расчете надежности таких систем предполагают, что отказ элемента является событием случайным и независимым.

Вероятность безотказной работы такой системы  $P_c(t)$  в течение времени  $t$  определяется как произведение вероятностей безотказной работы составляющих ее элементов:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_{ei}(t),$$

Если  $P_{\text{э}i}(t) = P_{\text{э}}(t)$ , то  $P_c(t) = (P_{\text{э}}(t))^n$ .

Известно, что в общем случае вероятность безотказной работы  $P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$ .  
Если известны интенсивности отказов элементов  $\lambda_{\text{э}i}(t)$ , то

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_{\text{э}i}(t) dt} = e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_{\text{э}i}(t) dt},$$

если  $\lambda_{\text{э}i}(t) = \lambda_{\text{э}}(t)$ , то  $P_c(t) = e^{-n \int_0^t \lambda_{\text{э}}(t) dt}$ .

Последующие уточнения законов распределения наработки до отказа элементов, входящих в структуру изделия, позволяют конкретизировать приведенные выше формулы, получить более точные оценки надежности рассматриваемого объекта.

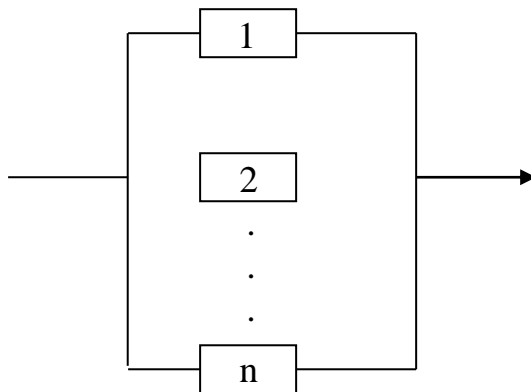
На практике наиболее часто интенсивность отказов является величиной постоянной (в период нормальной эксплуатации), а наработка на отказ не

противоречит экспоненциальному закону, тогда  $P_c(t) = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{э}i}}$ ,

т.е.  $P_c(t) = e^{-\lambda_c \cdot t}$ , где  $\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{э}i}$

#### 4. Определение вероятности безотказной работы технической системы при параллельном соединении элементов.

Параллельное соединение элементов такое, при котором отказ системы наступает при отказе всех элементов.



В этом случае определяют вероятность отказа системы  $F_c(t)$  за время  $t$ , как произведение вероятностей отказов  $F_i(t)$  всех ее элементов, то есть:



$$F_c(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$$

Тогда вероятность безотказной работы системы  $P_c(t) = 1 - F_c(t)$ .

### 5. Особенности расчета надежности восстанавливаемых объектов.

При расчете надежности восстанавливаемых объектов наряду с определением вероятности безотказной работы, функции распределения наработки на отказ, интенсивности отказов определяют показатели, характеризующие готовность объекта к выполнению требуемых функций в заданное время. К ним относятся коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя.

Коэффициентом готовности – отношение времени чистой работы к сумме времен чистой работы и простоев по техническим причинам (время восстановления работоспособного состояния объекта после отказа) за один и тот же календарный период.

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{Bi}},$$

где  $t_i$  – время работы объекта между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м отказом;

$t_{Bi}$  – время восстановления работоспособного состояния после  $i$ -го отказа;

$n$  – число отказов.

Если разделить числитель и знаменатель на  $n$ , то

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_B},$$

где  $T = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$  – среднее время наработки на отказ;

$T_B = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Bi}}{n}$  – среднее время восстановления.

Коэффициентом вынужденного простоя – отношение времени простоев по техническим причинам к сумме времен чистой работы и простоев по техническим причинам.

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Bi}}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{Bi}}; \text{ или } K_{\Pi} = \frac{T_B}{T + T_B}.$$

Как видно из формул для определения  $K_{\Gamma}$  и  $K_{\Pi}$ , они связаны между собой зависимостью

$$K_{\Gamma} + K_{\Pi} = 1.$$

Часто коэффициент готовности, вычисленный по приведенным выше формулам, определяют, как вероятность застать объект в работоспособном состоянии в любой момент времени, кроме тех периодов, когда использование объекта по назначению не предусмотрено. Это может быть справедливо при определенных допущениях.

В связи с тем, что вероятность возникновения отказа восстанавливаемого объекта в начале эксплуатации мала и возрастает с увеличением времени эксплуатации, вероятность застать объект в работоспособном состоянии в начале эксплуатации выше, и с течением времени будет уменьшаться. А на основании приведенных формул коэффициент готовности не зависит от времени.

Для преодоления этого противоречия приводится формула, определяющая зависимость вероятности застать объект в работоспособном состоянии  $P_{\Gamma}(t)$  от коэффициента готовности. При этом рассматривается наиболее простой случай, когда интенсивность отказов  $\lambda$  и интенсивность восстановления  $\mu$  – величины постоянные, и при  $t=0$  объект находится в работоспособном состоянии.

$$P_A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t},$$

где  $\lambda = \frac{1}{T}$ ;  $\mu = \frac{1}{T_B}$ .

После соответствующих преобразований формула принимает вид

$$P_{\Gamma}(t) = K_{\Gamma} + (1 - K_{\Gamma}) \cdot e^{-t / K_{\Gamma} \cdot T_B}$$

Эта формула устанавливает зависимость между коэффициентом готовности и вероятностью застать объект в работоспособном состоянии в любой момент времени  $t$ .

Из формулы видно, что при  $t \rightarrow \infty$   $P_{\Gamma}(t) \rightarrow K_{\Gamma}$ , т.е. трактовка коэффициента готовности как вероятности застать объект в работоспособном состоянии имеет смысл при установившемся процессе эксплуатации.

## 6. Марковский случайный процесс.

Процесс называется марковским, если для каждого момента времени вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от состояния системы в настоящий момент и не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние.

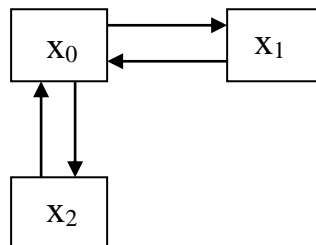
**Пример.** Имеется техническое устройство, состоящее из элементов типов a и b, обладающих разной надежностью. Эти элементы в случайные моменты времени и независимо друг от друга выходят из строя. Время безотказной работы элемента - случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону с параметрами  $\lambda_a$  и  $\lambda_b$ . В случае отказа работоспособность устройства

восстанавливается. Время восстановления также является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону с параметрами  $\mu_a$ ;  $\mu_b$  (интенсивность восстановлений элементов а и b соответственно). Имеет место марковский процесс с непрерывным временем и конечным множеством состояний:

$X_0$  – все элементы исправны, система работает;

$X_1$  – отказал элемент типа а, система восстанавливается;

$X_2$  – отказал элемент типа b, система восстанавливается.



Необходимое условие. Время работы до отказа и время восстановления случайные величины и распределены по экспоненциальному закону

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

$$g(t) = \mu e^{-\mu t}$$

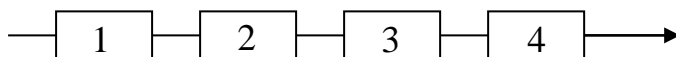
Потому что, только для этого распределения «предыстория» процесса не имеет значения, не влияет на дальнейшее поведение системы.

В теории надежности марковские процессы рассматриваются для определения вероятностей нахождения технической системы в том или ином состоянии в интересующие исследователя моменты времени.

При решении задач составляются системы дифференциальных уравнений, называемых уравнениями Эрланга.

### Примеры построения структурных схем и расчета надежности

Рассмотрим техническую систему с основным (последовательным) соединением элементов, состоящую из 4 элементов.



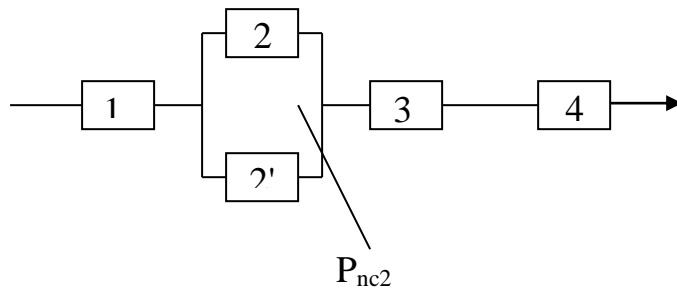
Вероятность безотказной работы каждого элемента равна:  $P_1=0,99$ ;  $P_2=0,9$ ;  $P_3=P_4=0,98$ .

Поставлена задача: вероятность безотказной работы системы должна быть на уровне 0,92-0,94.

Вероятность безотказной работы системы при основном соединении элементов определяется как произведение вероятностей безотказной работы элементов.

$$P_c = \prod_{i=1}^4 P_i = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 = 0,99 \cdot 0,9 \cdot 0,98^2 = 0,855.$$

Полученное значение меньше заданного. Анализ показывает, что самый ненадежный элемент 2. Поэтому применяем операцию резервирования, т.е. параллельно включаем в систему элемент 2', имеющий  $P_{2'}=P_2=0,9$ .



Будем рассматривать объединение элементов 2 и 2' как подсистему. При отказе элемента 2 в работу включается элемент 2', и только после отказа элемента 2' наступает отказ подсистемы и, как следствие, отказ системы. Поэтому для определения вероятности безотказной работы системы определим вероятность безотказной работы подсистемы  $P_{nc2}$ .

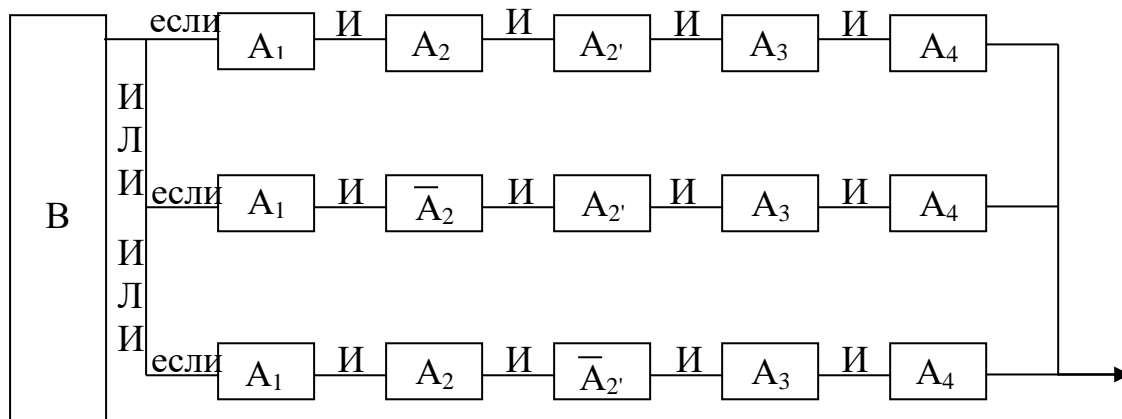
$$P_{nc2} = 1 - F_{nc2} = 1 - F_2 \cdot F_{2'} = 1 - F_2^2 = 1 - (1 - P_2)^2 = P_2 (2 - P_2).$$

$$P_c = P_1 \cdot P_2 (2 - P_2) \cdot P_3 \cdot P_4 = 0,99 \cdot 0,9 (2 - 0,9) \cdot 0,98^2 = 0,94.$$

Проблема решена, т.к. полученный результат отвечает поставленному условию.

Поставленная задача может быть решена с использованием приемов алгебры логики (алгебры Буля).

Для этого строим логическую схему.



где -

$V$  – работоспособное состояние системы;

$A_i$  – работоспособное состояние системы  $i$  – го элемента;

$\bar{A}_i$  – неработоспособное состояние  $i$  – го элемента;

И – логическое произведение;

ИЛИ – логическое сложение.

Тогда условие нахождения системы в работоспособном состоянии будет выглядеть так

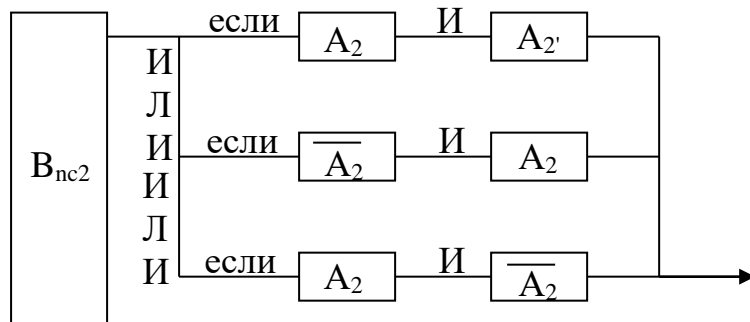
$$V = A_1 \cdot A_2 \cdot A_{2'} \cdot A_3 \cdot A_4 + A_1 \cdot \bar{A}_2 \cdot A_{2'} \cdot A_3 \cdot A_4 + A_1 \cdot A_2 \cdot \bar{A}_{2'} \cdot A_3 \cdot A_4.$$

Вероятность безотказной работы системы:

$$P_c = P(B) = P_1 \cdot P_2^2 \cdot P_3 \cdot P_4 + P_1 \cdot (1 - P_2) \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 + P_1 \cdot P_2 (1 - P_2) \cdot P_3 \cdot P_4 = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot (P_2 + 1 - P_2 + 1 - P_2) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 (2 - P_2), \text{ что}$$

аналогично полученному ранее выражению.

В заключение следует отметить следующее. Техническая система может находиться в одном из двух состояний: работоспособное и неработоспособное. Логическую схему целесообразно составлять для такого состояния системы, которое описывается меньшим количеством вариантов. Так, при определении вероятности безотказной работы подсистемы  $P_{nc2}$  с использованием алгебры логики получим



$$B_{nc2} = A_2 \cdot A_{2'} + \bar{A}_2 \cdot A_{2'} + A_2 \cdot \bar{A}_{2'}$$

$$P(B_{nc2}) = P_{nc2} = P_2^2 + (1 - P_2) \cdot P_2 + P_2 (1 - P_2) = P_2 (2 - P_2).$$

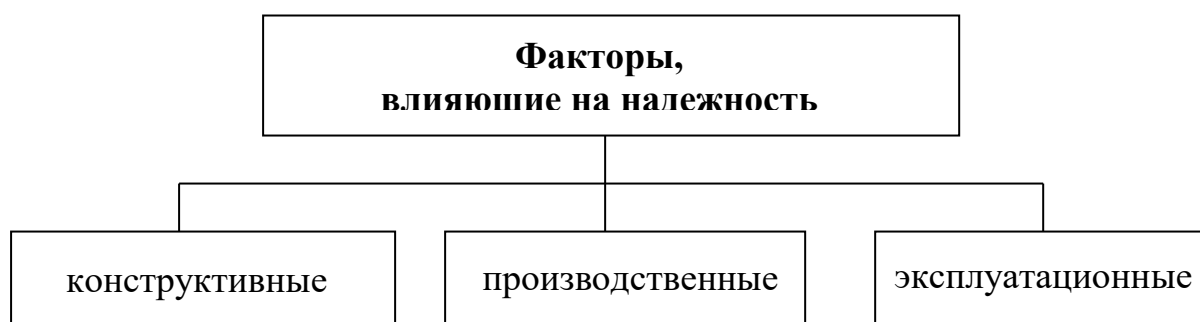
Этот путь более трудоемкий и длительный, чем определение  $P_{nc2}$  через  $F_{nc2}$ .

## 1.10 ЛЕКЦИЯ 10. (2 часа). Методы повышения надежности технических систем

Известно, что надежность закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и расходуется при эксплуатации. Поэтому и методы повышения надежности целесообразно разрабатывать для этих трех этапов жизненного цикла технической системы. Кроме того, надежность является комплексным свойством, включающим такие свойства как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Следовательно, и методы повышения надежности технической системы могут рассматриваться с позиций повышения каждого из этих свойств.

### 1. Факторы, влияющие на надежность технических систем.

Прежде чем изучать методы повышения надежности, рассмотрим факторы, влияющие на надежность технических систем.



Конструктивные факторы:

- выбранные конструктивная и структурная схемы;
- применяемые материалы и комплектующие изделия;
- способы резервирования;
- применяемые защитные и предохранительные устройства;
- нормативно-техническая и (или) конструкторская документация (НТД);
- учет при необходимости психофизиологических свойств операторов.

Производственные факторы:

- входной контроль качества и комплектующих изделий на соответствие требованиям, заложенным в НТД;
- уровень организации производства оборудования;
- квалификация и исполнительность персонала;
- контроль качества изготовления на всех этапах производственного цикла.

Эксплуатационные факторы:

- квалификация и исполнительность обслуживающего персонала;
- организация и качество технического обслуживания и ремонта;
- создание условий нормальной эксплуатации машин и оборудования;
- внешние факторы (воздействия климатических условий, электромагнитные и радиационные излучения, агрессивность среды);
- внутренние факторы (старение, износ, коррозия).

## **2. Методы повышения надежности на этапе проектирования.**

При проектировании сложных технических систем рассматривают два направления повышения надежности: использование схемных и конструктивных методов.

**Схемные методы** включают:

- создание схем с минимально необходимым числом элементов;
- применение резервирования;
- разработка схем, не допускающих опасных последствий отказов элементов;
- оптимизация последовательности работы элементов.

Уменьшение числа элементов при прочих равных условиях приводит к увеличению вероятности безотказной работы системы.

Резервирование – один из самых эффективных методов повышения надежности, т.к. в конструкции предусматривается заранее замена отказавшего элемента.

При создании систем, в которых предусматривается предотвращение некоторых отказов или ограничение последствий отказов, применяются защитные или предохранительные устройства.

Оптимизация последовательности работы элементов означает согласование периодов автоматической работы не только по времени, но и по достижении тем или иным параметрам заданного значения.

В число конструктивных методов повышения надежности входит:

- использование элементов с малой величиной интенсивности отказов;
- рациональный выбор совокупности контрольных параметров;
- рациональный выбор допусков на изменение основных параметров элементов и систем;
- защита элементов от вибраций и ударов;
- унификация элементов и систем;
- разработка эксплуатационной документации с учетом опыта применения системы, подобной конструируемой;
- обеспечение эксплуатационной технологичности конструкции (применение встроенных контрольных устройств, автоматизация контроля и индикация неисправностей, удобство подходов для обслуживания и ремонта).

## **3. Методы повышения надежности в производстве и эксплуатации.**

Среди методов повышения надежности при производстве основными являются:

- совершенствование технологии и организации производства, его автоматизация;
- применение инструментальных методов контроля качества продукции;
- тренировка элементов и систем.

К основным мероприятиям, позволяющим повысить надежность технических систем в эксплуатации, относятся:

- повышение квалификации обслуживающего персонала;
- применение инструментальных методов контроля технического состояния систем;
- обоснование объемов и сроков проведения профилактических мероприятий, основанных на применении теории надежности;
- обоснование сроков службы элементов и состава запасных частей;
- разработка и внедрение способов прогнозирования отказов.

В заключение следует еще раз отметить, что надежность закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и расходуется при эксплуатации. Поэтому методы повышения надежности в производстве, в первую очередь, направлены на успешную реализацию надежности, заложенной при проектировании, а в эксплуатации – на разумное ее расходование.



## 1.11-1.12 ЛЕКЦИЯ 8,9. (4 часа). Надежность системы «человек-машина»

### Понятие системы «человек-машина».

Рассмотрение любой системы требует тщательного изучения всех ее разнообразных компонентов и их взаимодействия — именно такой путь анализа сложных систем получил название «*системный анализ*». Компоненты системы (под компонентами здесь понимаются результаты членения системы до любого рассматриваемого уровня — подсистемы, агрегаты, элементы и др.) могут иметь самую разнообразную природу (например, живую и неживую) и предназначение (управляющие и управляемые). Их соединение в целостную систему далеко не всегда возможно, а если и возможно, то создатели и эксплуатационники таких систем могут испытать немало самых неожиданных трудностей. Системы, где человеку приходится работать со сложной техникой — яркое тому подтверждение. Рассмотрим их на примерах атомной станции (АС) и летательного аппарата.

С одной стороны мы имеем *техническую систему*, объединяющую множество связанных и взаимодействующих друг с другом подсистем, механизмов, агрегатов, трубопроводов и веществ. С другой стороны — человека, представляющего собой *биологическую систему*, элементами которой являются части тела, рецепторы (глаза, уши, кожа и др.), головной мозг. Отметим, что человек и техническая система (как совокупность технологического оборудования) не взаимодействуют друг с другом непосредственно. Так, человек-оператор никогда в процессе эксплуатации не соприкасается с ядерным реактором и другим загрязненным оборудованием; значительная часть клапанов, задвижек и другой арматуры регулируется дистанционно; и наконец, сам оператор, сидя за щитом управления во время работы даже не видит зал, в котором размещено оборудование АС. Взаимодействие человека с АС составляет по сути еще один компонент системы. Этот компонент — математическая, физическая или какая-либо иная система знаний (*интеллектуальная система*), описывающая закономерности функционирования и управления АС. Данная система может быть как субъективной, отражающей опыт и представление человека-оператора, так и объективной, являющейся формализованным обобщением проектирования, эксплуатации и анализа АС. Субъективная и объективная системы знаний в чем-то пересекаются, а в чем-то и дополняют друг друга. Так, субъективное знание каждого конкретного человека может оперировать неформализуемыми понятиями, слабо связанными явлениями и высокой степенью неопределенности, что недоступно точному объективному знанию, основанному на четких критериях и мерах (таких, как число) и воплощенному в виде систем автоматического управления.

Аналогичная картина наблюдается у летчика. В полете летчик непосредственно не видит двигатель летательного аппарата, выпущенное или убранное шасси, положение элементов, изменяющих траекторию движения летательного аппарата (рулей высоты и поворота, элеронов) и т.д. Летчик взаимодействует с оборудованием самолета дистанционно посредством различных органов управления.

Итак, мы ввели в рассмотрение три крайне разнородных компонента —

технический, биологический и интеллектуальный, составляющие вместе некий единый и целостный организм сложной системы. Серьезное изучение подобного объекта не может обойтись лишь узкой теоретической и практической базой – инженерной наукой, биологией, психологией и др., позволяющей исследовать каждый из упомянутых аспектов в отдельности. Для качественного и эффективного решения системных проблем необходима единая методологическая основа, объединяющая и систематизирующая рассмотрение всех указанных компонентов (вообще, подобные «системные» науки сегодня не редкость, например, экология, объединяющая рассмотрение техники, человека и биосферы).

В нашем случае (соединения техники, биологии и психологии) такая научная дисциплина получила название «Эргономика». Впервые слово «эргономика», происходящее от греческих слов *εργον* – работа, действие и *νομος* – закон, было сформулировано в 1857 г. Войтехом Ястшембовским, а аналогичная область знаний в США и ряде других неевропейских стран была названа «human factor». Сегодня эргономика определяется как междисциплинарная область науки и практики, направленная на интеграцию знаний о требованиях человека и нуждах человека в системе «человек-техника-среда» при проектировании технических компонентов и рабочих систем (Дж. Эклунд). Объектами исследований эргономики являются так называемые эргатические системы или системы «человек-машина» (СЧМ) (в различных источниках можно встретить другие, несущественно отличающиеся друг от друга названия: человеко-машинные системы, системы «человек-техника», системы «человек-техника-среда» и др.) дадим определение СЧМ.

В государственном стандарте за этим термином [2] закреплено довольно узкое понятие: *система «человек—машина» — это такая система, в которой субъект труда находится не непосредственно у объекта труда, а удален от него и осуществляет управление, используя информационную модель, т.е. субъект управления — оператор.*

Другое *определение*, данное известным американским исследователем в области человеческого фактора Мэйстером, расширяет класс СЧМ и указывает на наличие у системы общей одной или нескольких целей: *система «человек—машина» — это организация, состоящая из операторов мужского или женского пола, и машин, на которых они выполняют определенные действия, обеспечивающие реализацию тех целей, ради которых и была разработана система.*

Перечислим еще раз ключевые моменты, характеризующие СЧМ: сочетание человека и машины; особая роль человека, удаленность оператора от объекта управления; целеустремленность и заданное качество функционирования.

## Классификация систем «человек-машина».

Одним из наиболее существенных критериев классификации СЧМ является *вид конечной цели*, определяющей поведение системы (напомним, что СЧМ — целенаправленная система, целью которой является получение некоторого продукта труда). Этот признак предлагается в качестве основного критерия классификации, в соответствии с которым системы делятся на:

- > производственные, результатом функционирования, которых является новый материальный продукт (например: прокатный стан — стальной прокат; строительный комплекс — жилой дом; угледобывающий комбайн — добытый уголь);

- > эксплуатационные, результатом функционирования, которых является новое состояние материального объекта (например: автомобиль — новое положение перевозимого груза в пространстве; противоракетная установка — уничтоженная цель);

- > информационные, продуктом труда в которых является новая информация (например: система автоматизированного проектирования — проект; автоматизированные системы управления предприятием или технологическим процессом — управляющая информация; система связи — переданная информация).

Критерием классификации может стать *характер и форма операторской деятельности*, зависящие как от цели, так и от структурной организации системы. Выделяются следующие основные категории операторов:

- > оператор-технолог, непосредственно включенный в технологический процесс и выполняющий известные процедуры управления в режиме реального времени (операторы щитов управления энергетическими, химическими и другими производственными системами);

- > оператор-диспетчер, осуществляющий централизованный контроль и координацию различных явлений и событий, происходящих в реальном масштабе времени (авиадиспетчер, железнодорожный диспетчер, диспетчеры энергетических сетей);

- > оператор-наблюдатель, следящий за состоянием процесса, непрерывно протекающего в реальном масштабе времени, и его отклонениями от заданного режима (оператор радиолокационной станции, рулевой, удерживающий заданный курс);

- > оператор-манипулятор, реализующий жестко заданные последовательности механических воздействий на органы управления (оператор подготовки информации на ЭВМ, оператор кассового аппарата, техник по обслуживанию установки);

- > оператор-исследователь, действия которого не регламентированы заранее заданными инструкциями и базируются на понятийном мышлении (программист ЭВМ, экспериментатор, проектировщик системы автоматизированного проектирования);

- > оператор-руководитель, выполняющий функции организационного и директивного характера.

Конечно, подобная классификация условна, так как известны многочисленные случаи, когда невозможно провести четкую грань между различными типами операторов.

Распределение ролей между человеком и автоматикой довольно часто служит критерием классификации СЧМ. Так, в соответствии с этим критерием, различают

следующие виды:

- > целеустремленные — системы, в которых процесс функционирования определяется человеком;
- > целенаправленные — системы, в которых на отдельных этапах или при определенных режимах или условиях человек лишен возможности вмешаться в процесс функционирования системы;
- > целесообразные — системы, в которых человек не имеет возможности управлять процессом функционирования, но за ним сохраняются функции обеспечения процесса функционирования или прекращения его в случае аварийных или непланируемых ситуаций.

**Структура и качество управления СЧМ.** Рассмотрим структуру СЧМ и ее компоненты: человек (биологический СЧМ) и машина (технический компонент СЧМ). Машина при этом выступает в роли *объекта управления* (ОУ), предназначенного для производства некоторого конечного продукта. *Субъектом управления* является человек, выполняющий функции принятия решений и выработки управляющих воздействий. В определении СЧМ также отмечается, что человек удален от машины и взаимодействует с ней через некоторого посредника, олицетворяющего информационную модель ОУ. Этим посредником является компонент СЧМ – *человеко-машинный интерфейс* (ЧМИ), воплощающий интеллектуальную составляющую системы.

ЧМИ реализует двухстороннее общение человека с машиной, описываемое следующей схемой. Характеристики и параметры функционирования ОУ регистрируются с помощью датчиков, преобразующих информацию в электрические сигналы. Часть полученных сигналов после некоторой формальной обработки («Описание для автоматизации») направляется на входы систем автоматического управления (САУ) и регулирования (САР). Последние реагируют на поступившие сигналы немедленным жестко заданным откликом в виде управляющих воздействий на ОУ. Вторая часть сигналов, также пройдя некоторую обработку, образует информацию («Описание для человека»), которая затем поступает к системам отображения, преобразующим ее в пригодную для человеческого восприятия визуальную, акустическую или тактильную форму. Оператор анализирует поступившую информацию, принимает решение, соответствующее текущему состоянию ОУ и поставленной задаче, и воздействует на органы управления, преобразующие механические действия человека в управляющие сигналы. Эти сигналы передаются автоматическими системами или непосредственно к ОУ, изменяя его состояние. Информация об изменившемся состоянии вновь поступает к человеку и автоматике и цикл управления повторяется.

Сказанное свидетельствует о том, что качество управления СЧМ, сильно влияющее на эффективность ее функционирования, во многом зависит от идеологии ЧМИ, и в частности – оптимальности распределения функций управления между человеком и автоматикой. Эта задача обычно первой встает перед создателями сложной СЧМ. Интуитивно понятно, что задача разделения функций заключается в том, чтобы решить – что в управлении системой необходимо возложить на человека, а что можно доверить автоматическим устройствам. Сегодня в распоряжении разработчиков имеется два типа автоматических устройств — с жестко заданной логикой функционирования (САУ, САР) и с гибкой, программируемой логикой (компьютеры и системы, выполненные на

их основе).

**Неоспоримыми достоинствами автоматике являются:** высокое быстродействие и точность работы; длительный ресурс и продолжительность непрерывной работы; неограниченное число каналов параллельной обработки сигналов; большой объем памяти; высокая надежность и жесткий самоконтроль. Перечисленные качества в гораздо меньшей степени присущи человеку — он быстро устает, его ресурсы (память, быстродействие) крайне ограничены, он подвержен стрессам, его действия могут быть неточными, а работа в целом менее надежной. Все это говорит в пользу полной автоматизации системы.

Однако основным ограничением автоматике является детерминированность алгоритма ее работы. Это означает, что все возможные действия должны быть заранее предусмотрены и описаны, но одним из признаков сложной системы является тот факт, что ее поведение в некоторых случаях может оказаться для нас неожиданным. Другими словами, для сложной системы нет полностью адекватной модели, что в свою очередь делает невозможной полную автоматизацию процесса управления и, следовательно, требует наличия в контуре управления человека-оператора. Никакая автоматика сегодня не может превзойти человека в его способности к быстрому изменению алгоритма управления, возможность прогнозировать развитие событий на основе собственного опыта и интуиции, способности ориентироваться в условиях неполной или искаженной информации.

Итак, мы выделили первый фактор, влияющий на разделение функций: возможность формализованного детерминированного описания процесса управления («Технологический» фактор). Руководствуясь этим критерием, задачу распределения функций можно решить довольно просто. Нужно передать машине все то, что она способна выполнить, а остальное возложить на человека. Подобный подход предполагает, что развитие технических возможностей компьютеров и программного обеспечения позволит автоматизировать все большее число функций управления, постепенно вытесняя человека. Это приведет к уменьшению нагрузки на оператора и численности оперативного персонала, высвобождению операторов от многочисленных «мелких» забот, исключению малозначащих ошибок и ряду других положительных результатов. Хотя оператор по-прежнему будет иметь высший приоритет, однако, перестав быть постоянным активным участником процесса управления и находясь в роли пассивного наблюдателя, человек-оператор может стать источником серьезных инцидентов. Причиной этого явления служат негативные психические состояния, вызванные монотонней, возникающей из-за недостаточной информационной и эмоциональной нагрузки. В условиях монотонности возможно понижение внимания оператора, снижение уровня квалификации из-за длительных периодов «безделья», нежелание критически оценивать ситуацию и свои действия. В результате — человек не всегда может переключиться, собраться и принять правильное решение. Данный аспект автоматизации демонстрирует наличие еще одного важного фактора, подлежащего учету при разделении функций: адекватность психологическим особенностям человека («Психологический» фактор).

Выделенные два фактора (психологический и технологический) составляют лишь верхний уровень иерархии факторов, таких, как объемы перерабатываемой информации, скорости протекания процессов, сложность задач, уровень профессиональной подготовки, личностные качества, мотивация и др. Формирование оптимальных ролевых установок человека и машины в СЧМ возможно лишь при

условии комплексного анализа и учета всех этих факторов.

### **Надежность оператора.**

Нет необходимости доказывать, что надежность оперативного персонала (наряду с надежностью техники) является одним из важнейших процессуальных свойств, влияющих на качество, эффективность и безопасность работы сложной системы. Каким должен быть надежный оператор? Что следует понимать под надежностью человека?

Традиционно, надежный оператор — это хороший оператор, который пунктуально исполняет предписанный алгоритм деятельности. Это означает, что во всех потенциально возможных ситуациях у человека должны быть четкие алгоритмы работы. Но почему бы в этом случае не заменить человека более надежной и неприхотливой машиной? Если мы все-таки оставляем человека, то это автоматически означает, что мы допускаем наличие ситуаций, не описанных в инструкциях или описанных в них неверно, сознательно полагая, что в критических случаях оператор все-таки поведет себя незапланированно. В чем же тогда состоит надежность оператора?

Надежный оператор может пунктуально, шаг за шагом, выполнить инструкцию, нигде не ошибившись, и при этом... не достичь поставленной цели (то ли инструкция была несовершенной, то ли что-то нужно было сделать чуть-чуть лучше, быстрее или качественнее, чем требует инструкция). Считать ли этого оператора надежным?

Творчески мыслящий оператор может, нарушив инструкцию, проявить изобретательность в сложной ситуации и оптимизировать устаревшую, порой неверную процедуру (формально такие действия квалифицируются как ошибки). Считать ли этого оператора ненадежным?

Два оператора примерно одинаково действуют. Выполняя одну и ту же процедуру, однако, первый достигает «блестящего» результата, а второй — «так себе». Следует ли различать степень надежности этих операторов?

В последнее время определяя надежность оператора рассматривают *базовую надежность*, т.е. потенциальную способность организма человека к надежной работе, *прагматическую надежность*, которая выражается вероятностью выполнения оператором требуемого алгоритма действий, либо принятия оптимального (или хотя бы приемлемого) решения.

Наряду с прагматической трактовкой, на сегодняшний день весьма распространенным является понимание надежности как процессуального свойства, т.е. как способности человека безотказно работать. Такое понимание характерно для классической теории надежности технических систем. Именно такое определение дается и «Эргономическим» ГОСТом [2], в котором под надежностью человека-оператора понимается свойство человека-оператора, характеризующее его способность безотказно выполнять деятельность в течение определенного интервала времени при заданных условиях.

Важнейшим обстоятельством, характеризующим надежность, являются условия, в которых протекает деятельность оператора. Одно дело, когда надежным называют оператора, не ошибающегося в обычной спокойной обстановке, другое — когда он справился с задачей в экстремальной ситуации. Именно это подчеркивается в ряде определений, отмечающих, что надежность как свойство человека проявляется на любом требуемом уровне функционирования системы, при определенных условиях

работы и при возможном усложнении обстановки. Другим важным обстоятельством, присутствующим в большинстве определений, является время, выступающее в двух ролях — как ограничивающий фактор (выполнение задания должно завершиться своевременно — такое требование к надежной работе присутствует в «прагматических» определениях) и как условие (устойчивость работы должна сохраняться в течение заданного времени — такова надежность в «процессуальных» определениях).

Надежность оператора характеризуется показателями:

- *безотказности* — вероятность безотказной работы в течение определенного отрезка времени. Процент выполненных (не сорванных отказами) заданий, вероятность появления отказа в результате совершения ошибки, интенсивность и частота отказов в заданный момент времени, среднее время работы до первого отказа, среднее время работы между двумя отказами (наработка на отказ), общее число отказов за данный промежуток времени;
- *безошибочности* — вероятность безошибочной работы в течение определенного отрезка времени, общее число ошибок за данный промежуток времени, вероятность ошибки как отношение количества совершенных ошибок к числу возможных ошибок;
- *своевременности* — вероятность своевременного выполнения работы, т.е. фактическое время выполнения функции меньше предельно допустимого (оценка своевременности опирается на оценку быстродействия, показателем которого является время решения задачи или выполнения функции);
- *готовности* — коэффициент готовности оператора (вероятность включения оператора в работу в нужный момент времени);
- *восстанавливаемости* — вероятность исправления допущенной ошибки, среднее время восстановления.

### Отказ и ошибка оператора.

Очевидно, что смысл, вкладываемый в понятие надежности, напрямую зависит от того, что мы понимаем под отказом человека (иначе говоря, в чем состоит событие, наступления которого не должен допустить надежный оператор). Определения человеческого отказа многочисленны и, порой, разноречивы. Рассмотрим их.

Одно из первых определений *отказа*, близкое по смыслу к аналогичному понятию в технике, было сформулировано В.Д. Небылицыным следующим образом:

- ✓ в узком смысле отказом нужно считать прекращение работы вследствие развития органического или функционального, обратимого или необратимого процесса в сенсорной, моторной или церебральной сферах субъекта (сон, потеря сознания, «черная пелена», психические расстройства, непереносимое болевое ощущение, смерть);
- ✓ в широком смысле отказ — действие, которое ведет к ухудшению эффективности рабочего процесса.

Обратим внимание, что в этом определении появляются сразу две трактовки отказа — потеря человеком работоспособности и ухудшение работы системы. Позже обе эти трактовки легли в основу других определений:

- ✓ *отказ* следует рассматривать как полную или частичную потерю работоспособности, в результате которой человек перестает удовлетворять хотя бы

одному из требований, установленных для данного вида деятельности;

- ✓ если оператор допустил выход системы из нормального режима в зону ненормальной работы, принято считать, что произошел *отказ оператора*.

Опираясь на такое понимание отказа, рядом авторов была сформулирована концепция ошибки как особого вида кратковременного отказа, не связанного с потерей работоспособности и/или ухудшением работы системы.

Отказ человека квалифицируется как событие, проявляющееся в действии (или бездействии) оператора, влекущем за собой отклонение выходных параметров системы за установленные ограничения, которые он не предотвратил, или как событие, проявившееся в выходе за допустимые пределы характеристик жизнедеятельности оператора. *Ошибками оператора* будем называть все его неправильные действия, которые не влекли за собой отказ системы, а если и влекли, то были своевременно исправлены или парированы самим же оператором.

К другим определениям, в которых ошибка рассматривается как разновидность отказа, относятся:

- ✓ отказ человека-оператора — невыполнение человеком-оператором предписанных действий или снижение качества их выполнения за пределы, необходимые для достижения цели деятельности. Ошибка человека-оператора — вид отказа человека-оператора, не связанный с прекращением деятельности (ГОСТ [2]);
- ✓ ошибка — кратковременный отказ, причина которого самоустранима. Характерным для таких отказов является то, что они не связаны с какими-либо изменениями в организме оператора. При выполнении очередного действия отказ такого вида может уже не иметь места;
- ✓ ошибка оператора — кратковременный (биологический) отказ.

Наряду с системным рассмотрением ошибки — как частного вида отказа, нередко встречаются определения, опирающиеся на содержательную интерпретацию ошибок (в частности, на новое понятие — ошибочное действие).

К ним относятся:

- ✓ *ошибка оператора* — это любое конкретное действие человека в процессе его деятельности, которое выходит за некоторые допустимые границы, т.е. превышает допуск, границы которого определены режимами работы системы;
- ✓ неадекватное восприятие информации, неверные решения, неточные команды или неправильные действия персонала, инициирующие события, ведущие к отклонениям от режима нормальной эксплуатации, определяются как *ошибки человека*. Факт неправильного воздействия на процесс эксплуатации определяется как ошибочное действие человека;
- ✓ ошибка — результат ошибочного действия. Ошибочное действие — действие, не достигающее цели;
- ✓ ошибочное действие — такое, которое не адекватно объективным, социально заданным целям управления. В то же время оно адекватно субъективной цели человека и в этом смысле должно рассматриваться как закономерное (В.Ф. Венда);
- ✓ С.А. Чачко, опираясь на понятие «норма деятельности», определяет ошибку как кратковременное непроизвольное отклонение от нормы деятельности или однократное неправильное формирование нормы.

В эргономической практике существуют два взаимодополняющих подхода к проблеме анализа надежности и снижению ошибок персонала. Первый подход



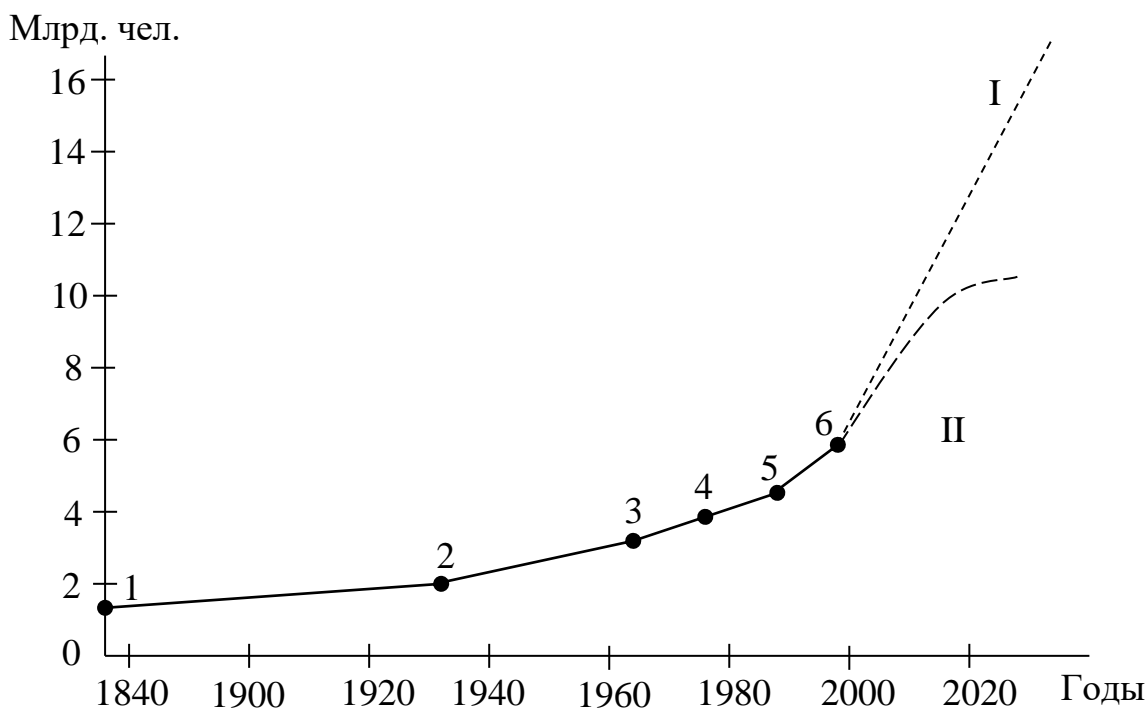
состоит в изучении ошибок, накоплении их статистики, описаний и детальном анализе с целью выявления необходимых изменений в системе человеко-машинном интерфейсе, эксплуатационной и нормативной документации или в подготовке операторов. Второй подход имеет противоположную направленность и основан на системном анализе операторской деятельности с целью выявления и предупреждения возможностей возникновения ошибок.

### 1.13-1.14 ЛЕКЦИЯ 13,14. (4 часа). Техногенный риск

#### 1. Техносфера. Возникновение и развитие.

Человек на протяжении многих тысячелетий своего существования непрерывно воздействовал на среду обитания. До середины XIX века это воздействие было незначительным. Но затем роль человека в преобразовании среды обитания стала резко возрастать. Это обусловлено в основном следующими процессами:

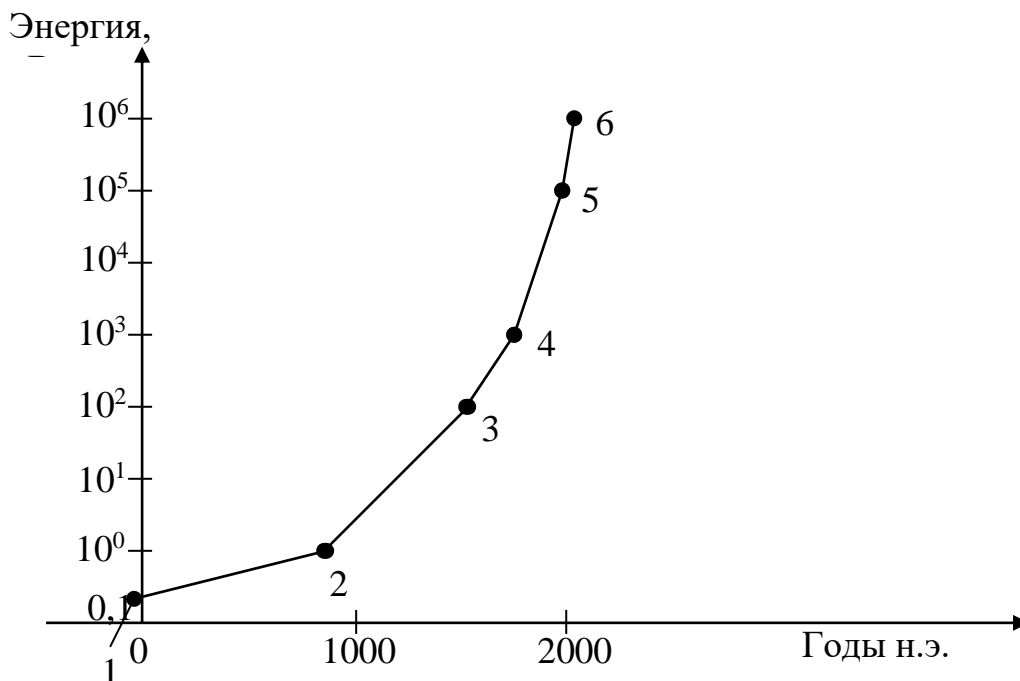
- рост численности населения на Земле и его урбанизация (см. рис. 1);
- рост потребления и концентрации энергетических ресурсов (см. рис. 2);
- интенсивное развитие промышленного и сельскохозяйственного производства;
- массовое использование транспортных средств;
- рост затрат на военные цели.



**Рис. 1. Рост численности населения Земли:**

I – рост численности до 28-30 млрд. чел. к 2070-2100 гг.;

II – стабилизация численности на уровне 10 млрд. чел.



**Рис. 2. Уровни энергии, которыми владеет человек:**

- |                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| 1 – осел, бык;             | 4 – ДВС (200 МВт) (1900); |
| 2 – лошадь;                | 5 – турбины, ТЭС и т.п.;  |
| 3 – паровая машина (1770); | 6 – АЭС, ракеты           |

Таким образом, если средой обитания человека до середины XIX века была биосфера, то в настоящее время во многих регионах она разрушена и создан новый тип среды обитания техносфера.

Биосфера – область распространения жизни на Земле, включающая нижний слой атмосферы, гидросферы и верхний слой литосферы, не испытавших техногенного воздействия.

Техносфера – среда обитания, возникшая с помощью прямого или косвенного воздействия людей и технических средств на природную среду с целью создания наилучшего соответствия среды социально-экономическим потребностям человека.

## **2. Возникновение опасных и чрезвычайных ситуаций. Аварии и катастрофы.**

Созданная руками и разумом человека техносфера, призванная максимально удовлетворять человеческие потребности в комфорте и безопасности, имеет и негативные черты.

Продолжающееся ускорение научно-технического прогресса выражается в интенсивном развитии промышленного и сельскохозяйственного производства, транспорта, коммунального хозяйства. Эти процессы характеризуются постоянным совершенствованием, изменением и усложнением современных технологий, установок и сооружений, возрастанием мощности единичных объектов (блоков, аппаратов и т.д.). И пока, к сожалению, все это ведет к увеличению опасности для человека, создает угрозу его здоровью, а часто и

жизни. Число человеческих жертв в развитых странах, вызванных в частности нарушениями в технической сфере достаточно высоко.

Для того, чтобы разрабатывать мероприятия по предотвращению подобных ситуаций, необходимо постоянно обобщать имеющуюся и поступающую информацию и создать соответствующие методики. В основу таких методик положены определения опасной и чрезвычайной ситуации, даны определения факторов риска.

Опасная ситуация наблюдается при нахождении человека в опасной зоне, т.е. в пространстве, где постоянно, периодически или эпизодически возникают опасности, обусловленные опасными или вредными факторами. Опасные ситуации реализуются вследствие совокупности причин, обуславливающих воздействие опасных или вредных факторов на человека, что приводит к постоянному или мгновенному повреждению его здоровья.

Чрезвычайная ситуация – это совокупность событий и опасностей, внезапно нарушающих сложившиеся условия жизнедеятельности, создающих угрозу жизни и здоровья людей, среде их обитания, элементам техногенной сферы.

Каждую чрезвычайную ситуацию можно рассматривать как крупномасштабную опасную ситуацию, создавшую угрозу одновременно большому числу людей и объектам техносферы. Стадии зарождения и развития чрезвычайной ситуации протекают, как правило, скрытно и связаны с накоплением разрушительного потенциала. На кульминационной стадии образуется множество опасных и вредных факторов, объединяемых в один или несколько поражающих факторов.

Происшествие – событие, состоящее из негативного воздействия с причинением ущерба людским, природным или материальным ресурсам.

Авария – происшествие в технической системе, не сопровождающееся гибелью людей, при котором восстановление технических средств невозможно или нецелесообразно.

Катастрофа – происшествие в технической системе, сопровождающееся гибелью или пропажей без вести людей.

Стихийное бедствие – происшествие, связанное со стихийными явлениями на Земле и приведением к разрушению биосферы, гибели или потере здоровья людей.

### **3. Основные источники аварий и катастроф.**

Элементы техносферы создают техногенные опасности, возникающие при загрязнении окружающей среды различными отходами и потоками энергий.

Загрязнение атмосферы. В атмосфере всегда содержится некоторое количество примесей естественного происхождения. Это называется фоновым уровнем загрязнения, который незначительно изменяется с течением времени. Наряду с этим существует техногенное загрязнение. Основными источниками его являются автотранспорт, теплоэнергетика и ряд отраслей промышленности.

Таблица 1

#### **Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу Российской Федерации, тыс. т**

Источники выбросов	1996 г.	2001 г.	2003 г.
Теплоэлектростанции	4748	3655,8	3446,6
Металлургические предприятия	6133	5973,3	5439,9
Нефтяная и газовая промышленность	2699	3264,3	3818,4
Химическая и нефтехимическая промышленность	454	437,4	403,3
Производства, выпускающие строительные материалы	528	455,0	448,0
Предприятия, перерабатывающие древесину	434	371,7	308,7
Автотранспорт	10 955	14 981	14 823,1

Самыми распространенными токсичными веществами, загрязняющими атмосферу, являются: оксид углерода  $\text{CO}$ , диоксид серы  $\text{SO}_2$ , оксиды азота  $\text{NO}_2$ , углеводороды  $\text{C}_n\text{H}_m$  и пыль. Высокие концентрации примесей в атмосферном воздухе и их миграция приводят к образованию более токсичных соединений (кислот) или к таким явлениям, как «парниковый эффект» и разрушение озонового слоя.

Загрязнение гидросферы. Потребление воды в России непрерывно растет и к 2000 г. составило  $85,9 \text{ км}^3$ . При использовании воду, как правило, загрязняют, а затем сбрасывают в водоемы. Внутренние воды загрязняются сточными водами различных отраслей промышленности, сельского и жилищно-коммунального хозяйства. Воздействие на гидросферу приводит к следующим негативным последствиям:

- снижаются запасы питьевой воды (40% контролируемых водоемов имеют загрязнения, превышающие 10 ПДК);
- изменяются состояние и развитие флоры и фауны водоемов;
- нарушается круговорот многих веществ в атмосфере;
- снижаются биомасса планеты и, как следствие, воспроизводство кислорода.

Загрязнение земель. Нарушение верхнего слоя земной коры обусловлено следующими видами деятельности человека:

- добыча полезных ископаемых и их обогащение;
- захоронение промышленных и бытовых отходов;
- проведение военных учений и испытаний.

Почвенный покров загрязняется осадками, в которых присутствуют элементы различных выбросов в атмосферу (кислотные дожди). Пахотные земли загрязняются при внесении удобрений и пестицидов. Известно, что из общего количества массы, извлекаемой при добыче полезных ископаемых, в оборот вовлекается не более трети. Большая часть отходов не используется и скапливается в отвалах. Острую проблему представляет утилизация и захоронение радиоактивных отходов. Опасны отходы сельскохозяйственного производства – навоз, остатки ядохимикатов, кладбища животных.

Следствием техногенного воздействия на почву является:

- отторжение пахотных земель или уменьшение их плодородия;
- чрезмерное насыщение растений токсичными веществами, которые затем могут попасть в продукты питания;
- нарушение биоценозов из-за гибели насекомых, птиц, животных, растений.

#### Энергетические загрязнения атмосферы.

К зонам со значительными техногенными опасностями относятся транспортные магистрали, зоны излучения радио- и телепередающих систем, промышленные зоны и т.п. Возможно проявление опасности при использовании человеком на производстве и в быту технических устройств: электрических сетей и приборов, станков, ручного инструмента, газовых баллонов и газовых сетей, оружия и т.п. Возникновение опасности в таких случаях связано, как правило, с наличием неисправностей в технических устройствах или неправильными действиями человека при их использовании. Уровень опасности при этом определяется энергетическими показателями технических устройств, которые существенно возросли в XX столетии, поскольку человек получил в свое распоряжение мощную технику, огромные запасы углеводородного сырья, химических и бактериологических веществ.

Промышленные предприятия, объекты энергетики, связи и транспорт являются основными источниками энергетического загрязнения промышленных регионов, городской среды, жилищ и природных зон. К энергетическим загрязнениям относят вибрационное и акустическое воздействие, электромагнитные поля и излучения, воздействия радионуклидов и ионизирующих излучений.

#### Антропогенные опасности.

Деятельность человека является важным, необходимым звеном, обеспечивающим взаимосвязь технических систем. При этом человек, оперируя энергетическими и информационными потоками, решает задачи, состоящие из ряда этапов: восприятие информации; ее оценка, анализ и обобщение на основе заранее заданных и сформулированных критериев, принятие решения о дальнейших действиях, исполнение принятого решения. Однако на всех этапах деятельности возможны ошибочные действия человека.

Анализ данных по техногенным авариям и катастрофам показывает, что значительная доля опасностей возникает в результате ошибочных, неправильно принятых человеком решений, когда он сам становится источником опасности. По статистике около 45 % аварийных ситуаций на АЭС, свыше 60 % аварий на объектах с повышенным риском, 80 % авиакатастроф и катастроф на море, а также 90 % автомобильных аварий происходит из-за неправильных действий людей.

#### **4. Классификация аварий и катастроф.**

Техногенные аварии и катастрофы наиболее часто возникают на объектах угольной, горнорудной, химической, нефтегазовой и металлургической отраслях

промышленности. Сведения об авариях и катастрофах техногенного характера, имевших место в России в 1999-2004 г.г., приведены в таблице.

Таблица 2

**Чрезвычайные ситуации, происшедшие на территории  
Российской Федерации за 1999-2004 гг.**

Чрезвычайные ситуации по характеру и виду источников возникновения	Число ЧС	
	1999	2004
Крушения, аварии на железнодорожном транспорте	10	4
Аварии грузовых и пассажирских судов	21	19
Авиационные катастрофы	29	35
Крупные автомобильные катастрофы	98	116
Аварии на магистральных и внутрипромысловых трубопроводах	46	55
Пожары (взрывы) в зданиях, на коммуникациях, технологическом оборудовании промышленных и сельскохозяйственных объектов	79	11
Пожары (взрывы) в зданиях и сооружениях жилого, социально- бытового и культурного назначения	288	502
Обнаружение (утрата) неразорвавшихся боеприпасов, взрывчатых веществ	42	22
Аварии с выбросом (угрозой выброса) аварийно-химически опасных веществ (АХОВ)	97	21
Аварии с выбросом (угрозой выброса) радиоактивных веществ (РВ)	15	4
Внезапное обрушение производственных зданий, сооружений, пород	4	9
Обрушение зданий и сооружений жилого, социально-бытового и культурного назначения	15	3
Аварии на электроэнергетических системах	22	8
Аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения	29	11
Аварии на тепловых сетях в холодное время года	60	13
Гидродинамические аварии	1	1
Итого	856	834

Основными причинами крупных техногенных аварий являются:

- отказы технических систем из-за дефектов изготовления и нарушений режимов эксплуатации; многие современные потенциально опасные

производства спроектированы так, что вероятность крупной аварии на них весьма высока и оценивается величиной риска  $10^{-4}$  и более;

- ошибочные действия операторов технических систем; статистические данные показывает, что более 60% аварий произошло в результате ошибок обслуживающего персонала;
- концентрация различных производств в промышленных зонах без должного изучения их взаимодействия;
- высокий энергетический уровень технических систем;
- внешние негативные воздействия на объекты энергетики, транспорта.

## 5. Классификация видов риска.

Формирование опасных и чрезвычайных ситуаций – результат определенной совокупности факторов риска, порождаемых соответствующими источниками. В широком смысле слова риск выражает возможную опасность, вероятность нежелательного события. Применительно к проблеме безопасности жизнедеятельности такими событиями являются: авария или катастрофа технической системы или устройства, загрязнение или разрушение экологической системы, гибель людей или возрастание смертности населения, материальный ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличение затрат на безопасность.

Каждое нежелательное событие может возникнуть по отношению к определенной жертве – объекту риска. Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать индивидуальный, технический, экологический, социальный и экономический риск. Каждый вид его обуславливает характерные источники и факторы, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3

Вид риска	Объект риска	Источник риска	Нежелательное событие
Индивидуальный	Человек	Условия жизнедеятельности человека	Заболевание, травма, инвалидность, смерть
Технический	Технические системы	Техническое несовершенство, нарушение правил эксплуатации технических систем и объектов	Авария, взрыв, катастрофа, пожар, разрушения
Экологический	Экологические системы	Антропогенное вмешательство в природную среду, техногенные чрезвычайные ситуации	Антропогенные экологические катастрофы, стихийные бедствия



Социальный	Социальные группы	Чрезвычайная ситуация, снижение качества жизни	Групповые травмы, заболевания, гибель людей, рост смертности
Экономический	Материальные ресурсы	Повышенная опасность производства или природной среды	Увеличение затрат на безопасность, ущерб от недостаточной защищенности

Аналитически риск выражает частоту реализации опасностей по отношению к возможному их числу,

$$R = \frac{N(t)}{Q_f},$$

R – риск определенного вида,

N(t) – число нежелательных событий за время t,

Q<sub>f</sub> – число объектов, подверженных определенному фактору риска.

## 6. Индивидуальный риск.

Индивидуальный риск обусловлен вероятностью реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций. Его можно определить по числу реализовавшихся факторов риска:

$$R_u = \frac{P(t)}{L(t)},$$

где R<sub>u</sub> – индивидуальный риск,

P(t) – число пострадавших за период времени t,

L(t) – число людей, подверженных риску за тот же период времени t.

Из источников индивидуального риска отметим социальную экологию, профессиональную деятельность, транспортные сообщения и т.д.

Наиболее распространенные факторы риска смерти: некачественные воздух, вода, продукты питания, опасные и вредные производственные факторы, аварии и катастрофы транспортных средств.

Индивидуальный риск может быть добровольным, если он обусловлен деятельностью человека на добровольной основе, и вынужденным, если человек подвергается риску в составе части общества (например, проживание в экологически неблагоприятных районах, вблизи источников повышенной опасности и т.д.).

## 7. Технический риск.

Технический риск – комплексный показатель надежности элементов техносферы. Он выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации

машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве зданий и сооружений.

$$R_T = \frac{A(t)}{T(t)},$$

где  $R_T$  – технический риск,

$A(t)$  – число аварий технологических систем данного вида за период времени  $t$ ,

$T(t)$  – число технических систем данного вида, находившихся в эксплуатации за период времени  $t$ .

Источники технического риска:

- Низкий уровень НИР,
- Низкий уровень ОКР,
- Опытное производство новой техники,
- Серийный выпуск небезопасной техники,
- Нарушение правил безопасной эксплуатации технических систем.

Источники и факторы технического риска приведены в таблице 4.

Таблица 4

Источники риска	Наиболее распространенные факторы технического риска
Низкий уровень научно-исследовательских работ	Ошибочный выбор по критериям безопасности направлений развития техники и технологий
Низкий уровень опытно-конструкторских работ	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.
Опытное производство новой техники	Некачественная доводка конструкции, технологии, документации по критериям безопасности.
Серийный выпуск небезопасной техники	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.
Нарушение правил безопасности эксплуатации технических систем	Использование техники не по назначению. Нарушение режимов эксплуатации, предусмотренных нормативно-технической документацией, несвоевременные профилактические осмотры и ремонты. Нарушение требований транспортировки и хранения.

## 8. Экологический риск.

Экологический риск выражает вероятность экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия

$$R_o = \frac{K(t)}{E(t)},$$

где  $R_o$  – экологический риск,

$K(t)$  – число антропогенных экологических катастроф и стихийных бедствий за определяемый период времени  $t$ ,

$I(t)$  – число потенциальных источников экологических разрушений на рассматриваемой территории за тот же период времени  $t$ .

К источникам экологического риска относят антропогенное вмешательство в природную среду, техногенное влияние на окружающую природную среду и природное явление. Наиболее распространенными факторами экологического риска являются: разрушение ландшафтов при добыче полезных ископаемых, образование искусственных водоемов, истребление лесных массивов, загрязнение водоемов, атмосферного воздуха вредными веществами, энергетическое загрязнение атмосферы.

## 9. Социальный риск.

Социальный риск характеризует масштабы и тяжесть негативных последствий чрезвычайных ситуаций, а также различного рода явлений и преобразований, снижающих качество жизни людей. По существу – это риск для группы или сообщества людей. Оценить его можно, например, по динамике смертности, рассчитанной на 1000 человек соответствующей группы:

$$R_c(t) = \frac{1000(C_2 - C_1)}{L},$$

$R_c(t)$  – социальный риск,

$C_1, C_2$  – число умерших (на 1000 чел.) в начале и в конце периода времени  $t$  соответственно,

$L$  – общая численность исследуемой группы.

К источникам социального риска относят: урбанизация экологически неустойчивых территорий, промышленные технологии и объекты повышенной опасности, социальные и военные конфликты, эпидемии, снижение качества жизни. Наиболее распространенными факторами социального риска являются: поселение людей в зоне возможного затопления, повышенной сейсмичности, аварии на АЭС, ТЭС, продуктопроводах, транспортные катастрофы, техногенное заражение окружающей среды, боевые действия, ухудшение медицинского обслуживания, неудовлетворительные жилищно-бытовые условия.

## 10. Экономический риск.

Экономический риск определяется соотношением пользы и вреда, получаемых обществом от рассматриваемого вида деятельности:

$$R_y = \frac{\hat{A}}{\hat{I}} \cdot 100\% ,$$

где  $R_y$  – экономический риск, %,

$B$  – вред обществу от рассматриваемого вида деятельности,

$\Pi$  – польза.

$$B = C_{\hat{a}} + O ,$$

где  $Z_6$  – затраты на достижение заданного уровня безопасности,

$Y$  – ущерб, обусловленный недостаточной защищенностью человека и среды его обитания от опасностей.

Польза, получаемая от рассматриваемого вида деятельности:

$$\hat{I} = \hat{A} - C_n - \hat{A} > 0 \text{ или } \hat{I} = \hat{A} - C_n - C_{\hat{a}} - O > 0 ,$$

где  $D$  – общий доход, получаемый от рассматриваемого вида деятельности,

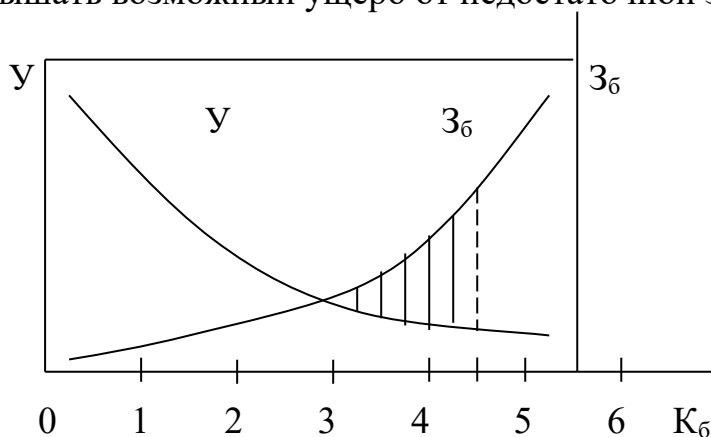
$Z_n$  – основные производственные затраты.

Формула экономически обоснованной безопасности жизнедеятельности имеет вид:

$$Y < D - (Z_n + Z_6) .$$

Возникает вопрос о поиске оптимального соотношения затрат на безопасность и возможного ущерба от недостаточной защищенности. Существует много методических разработок решения этой проблемы. Достаточно наглядной является следующая. Вводится понятие уровня безопасности, который характеризуется 5-балльным коэффициентом  $K_6$ .

На графике показан один из вариантов анализа ущерба и затрат на безопасность. Чем меньше затраты на безопасность, тем больше ущерб, и наоборот. Оптимальные соотношения находятся в заштрихованной зоне правее точки пересечения кривых  $Y=Z_6$ . Это значит, что затраты на безопасность должны превышать возможный ущерб от недостаточной защищенности.



## 1.15-1.17 ЛЕКЦИЯ 15,16,17. (6 часов). Основы теории риска

### 1.Общий план анализа риска

Анализ риска проводится по следующей схеме:

1. Планирование и организация работ.
2. Идентификация опасностей.
  - 2.1. Выявление опасностей.
  - 2.2. Предварительная оценка характеристик опасностей.
3. Оценка риска.
  - 3.1. Анализ частоты.
  - 3.2. Анализ последствий.
4. Разработка рекомендаций по управлению риском.

### 2. Планирование и организация работ

Анализ риска проводится для того, чтобы обеспечить **вход** в процесс управления риском, однако, более точный выбор задач, средств и методов анализа риска обычно не регламентируется. В нормативно-правовых актах подчеркивается, что анализ опасности должен соответствовать сложности рассматриваемых процессов, наличию необходимых данных и квалификации специалистов, проводящих анализ. При этом более простые и понятные методы анализа следует предпочитать более сложным и не до конца ясным и методологически обеспеченным. Поэтому на первом этапе необходимо:

- указать причины и проблемы, вызывающие необходимость проведения анализа риска;
- определить анализируемую систему и дать ее описание;
- подобрать соответствующую команду для проведения анализа;
- установить источники информации о безопасности системы;
- указать исходные данные и ограничения, обуславливающие пределы анализа;
- четко определить цели анализа и критерии приемлемого риска.

Во всех нормативах содержится требование документального оформления этого этапа анализа риска.

### 3. Идентификация опасностей

Основная задача – выявление (на основе информации о данном объекте, результатов экспертизы и опыта работы подобных систем) и четкое описание всех присущих системе опасностей. Это – ответственный этап, так как не выявленные на этом этапе опасности не подвергаются дальнейшему рассмотрению, что может привести к весьма нежелательным последствиям. Существует целый ряд формальных методов выявления опасностей. Один из них – метод анализа видов отказов и их последствий. С помощью этого метода последовательно рассматривается каждый элемент, и анализируются все возможные виды отказов и (или) аварийных ситуаций и выявляются их результирующие воздействия на систему. Отдельные аварийные ситуации и виды отказов элементов выявляются и анализируются для того, чтобы определить их воздействие на другие элементы и систему в целом. Для каждого вида отказа анализируются последствия, намечаются меры по их устранению.

Дополнительно для каждого вида отказов должен быть составлен перечень необходимых проверок.

Другой метод – метод анализа критичности. Он предусматривает классификацию элементов в соответствии со степенью влияния каждого из них на выполнение системой общей задачи. Устанавливаются группы критичности для различных видов отказов.

Например:

- 1 – отказ, приводящий к дополнительному техобслуживанию;
- 2 – отказ, приводящий к остановкам в работе или потере трудоспособности;
- 3 – отказ, который может привести к невыполнению основной задачи;
- 4 – отказ, потенциально приводящий к жертвам.

Данный метод не дает количественной оценки возможных последствий, но позволяет ответить на вопросы:

- какой элемент следует подвергнуть детальному анализу с целью исключения аварий;
- каковы нормативы входного контроля;
- где дополнительно следует вводить специальные процедуры, правила безопасности и другие защитные мероприятия;
- как наиболее эффективно затратить средства для предотвращения аварий.

Но прежде проводится предварительная оценка опасностей для выбора дальнейшего направления деятельности:

- прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей;
- провести более детальный анализ риска;
- выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

Результаты предварительной оценки опасностей также документируются.

Процесс анализа риска может закончиться этим этапом.

#### **4. Оценка риска**

Если есть необходимость, переходят к этому этапу оценки риска. На этом этапе идентифицированные опасности должны быть оценены на основе критериев приемлемого риска, чтобы идентифицировать опасности с неприемлемым уровнем риска, что является основой для разработки рекомендаций и мер по уменьшению опасностей. При этом и критерии приемлемого риска, и результаты оценки риска могут быть выражены как качественно, так и количественно.

Оценка риска включает в себя анализ частоты и последствий. Понятие риска всегда включает два элемента: частоту, с которой осуществляется опасное событие, и последствия опасного события. Анализ риска заключается в выявлении (идентификации) опасностей и оценке риска, когда под опасностью понимается источник потенциального ущерба или вреда, а под идентификацией опасности – процесс выявления опасности и определения ее характеристик. Для анализа частоты обычно используют:

- имеющиеся данные, соответствующие типу системы, объекта или вида деятельности;
- методы анализа деревьев событий или деревьев отказов;

- экспертная оценка с учетом мнения специалистов в данной области.

Анализ последствий включает оценку воздействий на людей, имущество или окружающую среду. Для прогнозирования последствий необходимы модели и сущности поражающих факторов, так как нужно оценить физические эффекты нежелательных событий.

Имеется много неопределенностей, связанных с оценкой риска. Анализ неопределенностей – необходимая составная часть оценки риска. Как правило, основные источники неопределенностей – информация по надежности оборудования и человеческим ошибкам, а также допущения применяемых моделей аварийного процесса. Чтобы правильно интерпретировать величины риска, надо понимать неопределенности и их причины. Анализ неопределенности – это перевод неопределенности исходных параметров и предположений, использованных при оценке риска, в неопределенность результатов. Источники неопределенности должны по возможности идентифицироваться. Основные параметры, к которым анализ является чувствительным, должны быть представлены в результатах.

Важно подчеркнуть, что сложные и дорогостоящие расчеты зачастую дают значение риска, точность которого не велика. Для сложных технических систем точность расчетов индивидуального риска, даже в случае наличия всей необходимой информации, не лучше одного порядка. При этом проведение полной количественной оценки риска более полезно для сравнения различных вариантов (например, размещения оборудования), чем для заключения о степени безопасности объекта. Зарубежный опыт показывает, что наибольший объем рекомендаций по обеспечению безопасности вырабатывается с применением качественных (инженерных) методов анализа риска, позволяющих достигать основных целей анализа при использовании меньшего объема 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.

Наконец, последний этап анализа риска технологической системы – разработка рекомендаций по уменьшению уровня риска (управлению риском) в случае, если степень риска выше приемлемой.

## **5. Оценка допустимого риска**

Оценка величины любого риска производится сравнением его фактической величины, изменяющейся от 0 до 1, с его приемлемой величиной. Приемлемый риск является некоторым компромиссом между негативными последствиями риска (вред, ущерб, потери) и затратами на их предупреждение или сокращение. Приемлемым можно считать такой уровень риска, с которым общество, бизнес соглашаются на данном этапе своего развития. Опираясь на величину приемлемого риска, можно весь диапазон рисков дифференцировать на пять уровней, закрепив за ними следующие названия: малый, приемлемый, повышенный, высокий и чрезвычайный риски.

Приемлемую величину каждого вида риска можно научно обосновать. Так приемлемую величину валеологического риска смерти людей можно установить равной  $5 \cdot 10^{-4}$ . Это соответствует данным ВОЗ, согласно которым в современном

мире практически невозможно предотвратить 5 смертей от общих заболеваний на каждые 10000 человек в возрасте до 30 лет. С таким риском общество вынуждено соглашаться, поскольку затраты на его снижение будут бесполезными вследствие названных причин.

Аналогичным образом можно обосновать приемлемость экологического риска. Так, экологическая наука утверждает, что если ущерб окружающей природной среде не превышает 5% ее общей ресурсной базы для конкретной местности, то природа сохраняет способность к полной самостоятельной реабилитации. Указанную величину экологического риска можно считать приемлемой. На ее основе предлагается установить пять классов экологической безопасности производства: безопасное, приемлемой опасности, повышенной опасности, опасное и чрезвычайно опасное.

Концепция приемлемого технического риска стала реальной альтернативой не оправдавшему себя на практике категорическому императиву абсолютной безопасности. Приемлемый технический риск необходимо устанавливать для каждого вида технических систем. Его целесообразно определять на стадии проектирования и указывать в технической документации. Результаты анализа аварийности объектов техносферы позволяют установить обобщенный уровень приемлемого технологического риска в пределах 0,05...0,1.

Приемлемую величину экономического риска лучше соотносить с реально достижимой рентабельностью производства, допуская при этом, что обе эти величины являются обратными по отношению друг к другу. Исходя из этого, можно считать, что экономический риск, равный 0,25...0,30, в большинстве случаев будет приемлемым, так как он соответствует достаточно высокому уровню рентабельности, равному 70...75%.

В таблице представлена примерная дифференциация названных видов рисков, которая может служить ориентиром при установлении приемлемости рисков для конкретных условий жизнедеятельности.

Вид риска	Примерные уровни риска за год, в процентах				
	малый	приемлемый	повышенный	высокий	чрезвычайный
Валеологический : гибель чел./год	<0.01	0,01...0,05	0,05...0,5	0,5...2,0	>2,0
Экологический	<1.0	1...5	5...25	25...50	>50
Технический	<5	5...10	10...25	25...50	>50
Экономический	<15	25...30	30...50	50...75	>75



## 2. ТЕМАТИКА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

### 2.1. (20 часов). ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ И ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Цель работы: Приобретение навыков по овладению методами расчетов элементов технологического оборудования по критериям работоспособности и надежности

#### Теоретические сведения

Выпишем формулы, по которым определяются количественные характеристики надежности изделия

$$p(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) = 1 - \int_0^t f(t) dt; \quad (2.1)$$

$$q(t) = 1 - p(t); \quad (2.2) \quad (2.3)$$

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}; \quad (2.4)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}; \quad (2.5)$$

$$m_t = \int_0^{\infty} p(t) dt,$$

где  $p(t)$  - вероятность безотказной работы изделия на интервале времени от 0 до  $t$ ;  $q(t)$  - вероятность отказа изделия на интервале времени от 0 до  $t$ ;  $f(t)$  - частота отказов изделия или плотность вероятности времени безотказной работы изделия  $T$ ;

$\lambda(t)$  - интенсивность отказов изделия;  $m_t$  - среднее время безотказной работы изделия.

Формулы (2.1) - (2.5) для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид

$$p(t) = e^{-\lambda t}; \quad (2.6)$$

$$q(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (2.7)$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}; \quad (2.8)$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda; \quad (2.9)$$

$$m_t = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.10)$$

Формулы (2.1) - (2.5) для нормального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид

$$p(t) = 0,5 - \Phi(U); \quad U = \frac{t - m_t}{\sigma_t}; \quad (2.11)$$

$$q(t) = 0,5 + \Phi(U); \quad \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{v^2}{2}} dv; \quad (2.12)$$

$$f(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma_t}; \quad \varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{U^2}{2}}; \quad (2.13)$$

$$\lambda(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma(t)} \cdot \frac{1}{0,5 - \Phi(U)}, \quad (2.14)$$

где  $\Phi(U)$  - функция Лапласа, обладающая свойствами

$$\Phi(0)=0; \quad (2.15)$$

$$\Phi(-U) = -\Phi(U); \quad (2.16)$$

$$\Phi(0)=0.5. \quad (2.17)$$

### Решение типовых задач.

Задача 2.1. Время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром  $\lambda = 2.5 \cdot 10^{-5}$  1/час.

Требуется вычислить количественные характеристики надежности элемента  $p(t), q(t), f(t), m_t$  для  $t=1000$  час.

Решение. Используем формулы (2.6), (2.7), (2.8), (2.10) для  $p(t), q(t), f(t), m_t$ .

1. Вычислим вероятность безотказной работы:

$$p(t) = e^{-\lambda t} = e^{-2.5 \cdot 10^{-5} t}.$$

Используя данные таблицы П.7.14 [ 1 ] получим

$$p(1000) = e^{-2.5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = e^{-0.025} = 0.9753.$$

2. Вычислим вероятность отказа  $q(1000)$ . Имеем

$$q(1000) = 1 - p(1000) = 0.0247.$$

3. Вычислим частоту отказов

$$f(t) = \lambda(t) p(t) = 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2.5 \cdot 10^{-5} t}; \quad f(1000) = 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2.5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot 0.9753 = 2.439 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час.}$$

4. Вычислим среднее время безотказной работы

$$m_t = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2.5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ час.}$$

Задача 2. 2. Время работы элемента до отказа подчинено нормальному закону с параметрами  $m_t = 8000$  час,  $\sigma_t = 2000$  час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности  $p(t), f(t), (t), m_t$  для  $t = 10000$  час.

Решение. Воспользуемся формулами (2.11), (2.12), (2.13), (2.14) для  $p(t), f(t), (t), m_t$ .

1. Вычислим вероятность безотказной работы

$$p(t) = 0.5\Phi(U) ; U = (t - m_t) / \sigma_t ;$$

$$U = (10000 - 8000) / 2000 = 1; \Phi(1) = 0.3413 ;$$

$$p(10000) = 0.5 - 0.3413 = 0.1587. 2. Определим частоту отказа  $f(t)$$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_t} \cdot \exp \left[ -\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma_t^2} \right].$$

Введем обозначение

$$\varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U^2}{2}} ; \varphi(-U) = \varphi(U)$$

Тогда

$$f(t) = \varphi(U) / \sigma_t ; U = (t - m_t) / \sigma_t ;$$

$$f(1000) = (1) / 2000 = 0.242 / 2000 = 12.1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час.}$$

3. Рассчитаем интенсивность отказов  $(t)$

$$(t) = f(t) / p(t);$$

$$(10000) = f(10000) / p(10000) = 12.1 \cdot 10^{-5} / 0.1587 = 76.4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час.}$$

4. Среднее время безотказной работы элемента

$$m_t = 8000 \text{ час.}$$

### Задачи для самостоятельного решения.

Задача 2.6. Вероятность безотказной работы автоматической линии изготовления цилиндров двигателя комбайна в течении 120 час равна 0.9. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется рассчитать

интенсивность отказов и частоту отказов линии для момента времени  $t = 120$  час., а также среднее время безотказной работы.

Задача 2.7. Среднее время безотказной работы автоматической системы управления равно 640 час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение 120 час., частоту отказов для момента времени  $t = 120$  час и интенсивность отказов.

Задача 2.8. Время работы изделия подчинено нормальному закону с параметрами  $m_t = 8000$  час.,  $\sigma_t = 1000$  час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности  $p(t)$ ,  $f(t)$ ,  $h(t)$ ,  $m_t$  для  $t = 8000$  час.

2.2. (10 часов). ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ И НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ОБ ОТКАЗАХ .

### Теоретические сведения

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$P^*(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (1.1)$$

где  $n(t)$  - число изделий, не отказавших к моменту времени  $t$ ;  $N$  - число изделий, поставленных на испытания;  $P^*(t)$  - статистическая оценка вероятности безотказной работы изделия.

Для вероятности отказа по статистическим данным справедливо соотношение

$$q^*(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (1.2)$$

где  $N - n(t)$  - число изделий, отказавших к моменту времени  $t$ ;  $q^*(t)$  - статистическая оценка вероятности отказа изделия.

Частота отказов по статистическим данным об отказах определяется выражением

$$f^*(t) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (1.3)$$

где  $\Delta n(t)$  - число отказавших изделий на участке времени  $(t, t + \Delta t)$ ;  $f^*(t)$  - статистическая оценка частоты отказов изделия;  $\Delta t$  - интервал времени.

Интенсивность отказов по статистическим данным об отказах определяется формулой

$$\lambda^*(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot n(t)}, \quad (1.4)$$

где  $n(t)$  - число изделий, не отказавших к моменту времени  $t$ ;  $\Delta n(t)$  - число отказавших изделий на участке времени  $(t, t + \Delta t)$ ;  $\Delta t$  - интервал времени,  $\lambda(t)$  - статистическая оценка интенсивности отказов изделия.

Среднее время безотказной работы изделия по статистическим данным оценивается выражением

$$m_t^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (1.5)$$

где  $t_i$  - время безотказной работы  $i$ -го изделия;  $N$ - общее число изделий, поставленных на испытания;  $m_t^*$  - статистическая оценка среднего времени безотказной работы изделия.

Для определения  $m_t^*$  по формуле (1.5) необходимо знать моменты выхода из строя всех  $N$  изделий. Можно определять  $m_t^*$  из уравнения

$$m_t^* \approx \sum_{i=1}^m n_i t_{cp,i}, \quad (1.6)$$

где  $n_i$  - количество вышедших из строя изделий в  $i$ -ом интервале времени;

$t_{cp,i} = (t_{i-1} + t_i)/2$ ;  $m = t_k/t$ ;  $t = t_{i+1} - t_i$ ;  $t_{i-1}$  - время начала  $i$ -го интервала;  $t_i$  - время конца  $i$ -го интервала;  $t_k$  - время, в течение которого вышли из строя все изделия;  $t$  - интервал времени.

Дисперсия времени безотказной работы изделия по статистическим данным определяется формулой

$$D_t^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - m_t^*)^2, \quad (1.7)$$

где  $D_t^*$  - статистическая оценка дисперсии времени безотказной работы изделия.

### Решение типовых задач

Задача 1.1. На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп, за 3000 час. отказало 80 ламп. Требуется определить  $P^*(t)$ ,  $q^*(t)$  при  $t = 3000$  час.

Решение. В данном случае  $N = 1000$ ;  $n(t) = 1000 - 80 = 920$ ;  $N - n(t) = 1000 - 920 = 80$ . По формулам (1.1) и (1.2) определяем

$$P^*(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{920}{1000} = 0.92,$$

$$q^*(3000) = \frac{N - n(t)}{N} = \frac{80}{1000} = 0.08,$$

или  $q^*(3000) = 1 - P^*(3000) = 1 - 0.92 = 0.08$ .

Задача 1.2. На испытание было поставлено 1000 однотипных ламп. За первые 3000 час. отказало 80 ламп, а за интервал времени 3000 - 4000 час. отказало еще 50 ламп. Требуется определить статистическую оценку частоты и интенсивности отказов электронных ламп в промежутке времени 3000 - 4000 час.

Решение. В данном случае  $N = 1000$ ;  $t = 3000$  час;  $\Delta t = 1000$  час;  $\Delta n(t) = 50$ ;  $n(t) = 920$ .

По формулам (1.3) и (1.4) находим

$$f^*(t) = f^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{N \Delta t} = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 5 \cdot 10^{-5} 1/\text{час}$$

$$\lambda^*(t) = \lambda^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot n(t)} = \frac{100}{100 \cdot 200} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}$$

Задача 1.3. На испытание поставлено  $N = 400$  изделий. За время  $t = 3000$  час отказало 200 изделий, т.е.  $n(t) = 400 - 200 = 200$ . За интервал времени  $(t, t + \Delta t)$ , где  $\Delta t = 100$  час, отказало 100 изделий, т.е.  $\Delta n(t) = 100$ . Требуется определить  $P^*(3000)$ ,

$P^*(3100)$ ,  $f^*(3000)$ ,  $\lambda^*(3000)$ .

Решение. По формуле (1.1) находим

$$P^*(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{200}{400} = 0,5$$

$$P^*(3100) = \frac{n(t)}{N} = \frac{100}{400} = 0,25$$

Используя формулы (1.3) и (1.4), получим

$$f^*(t) = f^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{100}{400 \cdot 100} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ (1/час)}$$

$$\lambda^*(t) = \lambda^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot n(t)} = \frac{100}{100 \cdot 200} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ (1/час)}$$

Задача 1.4. На испытание поставлено 6 однотипных изделий. Получены следующие значения  $t_i$  ( $t_i$  - время безотказной работы  $i$ -го изделия) :  $t_1 = 280$  час;  $t_2 = 350$  час;  $t_3 = 400$  час;  $t_4 = 320$  час;  $t_5 = 380$  час;  $t_6 = 330$  час.

Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

Решение. По формуле (1.5) имеем

$$m_t^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{280 + 350 + 400 + 320 + 380 + 330}{6} = \frac{2060}{6} = 343,3 \text{ час.}$$

Задача 1.5. За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зафиксировано 7 отказов. Время восстановления составило:

$t_1 = 12$  мин.;  $t_2 = 23$  мин.;  $t_3 = 15$  мин.;  $t_4 = 9$  мин.;  $t_5 = 17$  мин.;  $t_6 = 28$  мин.;  $t_7 = 25$  мин.;  $t_8 = 31$  мин. Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры  $m_{te}^*$ .

Решение.

$$m_{te}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{12 + 23 + 15 + 9 + 17 + 28 + 25 + 31}{8} = \frac{160}{8} = 20 \text{ мин.}$$

Задача 1.6. В результате наблюдения за 45 образцами радиоэлектронного оборудования получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенные в табл.1.1. Требуется определить  $m_e^*$ .

Таблица 1.1

ti, час.	ni	ti, час.	ni	ti, час.	ni
0-5	1	30-35	4	60-65	3
5-10	5	35-40	3	65-70	3
10-15	8	40-45	0	70-75	3
15-20	2	45-50	1	75-80	1
20-25	5	50-55	0		
25-30	6	55-60	0		

Решение. В данном случае

$$t_{\Phi 1} = 2,5, t_{\Phi 2} = 7,5, t_{\Phi 3} = 12,5, t_{\Phi 4} = 17,5, t_{\Phi 5} = 22,5, t_{\Phi 6} = 27,5, t_{\Phi 7} = 32,5, t_{\Phi 8} = 37,5, t_{\Phi 9} = 42,5, \\ t_{\Phi 10} = 47,5, t_{\Phi 11} = 52,5, t_{\Phi 12} = 57,5, t_{\Phi 13} = 62,5, t_{\Phi 14} = 67,5, t_{\Phi 15} = 72,5, t_{\Phi 16} = 77,5; N = 45; m = 16.$$

Используя формулу (1.6), получим

$$m_t^* \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m n_i \cdot t_{\Phi i} = \frac{1 \cdot 2,5 + 5 \cdot 7,5 + 8 \cdot 12,5 + 2 \cdot 17,5 + 5 \cdot 22,5 + 6 \cdot 27,5 + 4 \cdot 32,5 + \\ + 3 \cdot 37,5 + 0 \cdot 42,5 + 1 \cdot 47,5 + 0 \cdot 52,5 + 0 \cdot 57,5 + 3 \cdot 62,5 + 3 \cdot 67,5 + 3 \cdot 72,5 + 1 \cdot 77,5}{45} = \frac{1427,5}{45} = 31,7$$

ч.

### Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.7. На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 час. отказало 50 изделий. За интервал времени 4000 - 4100 час. отказало ещё 20 изделий. Требуется определить  $f^*(t)$ ,  $q^*(t)$  при  $t=4000$  час.

Задача 1.8. На испытание поставлено 100 однотипных изделий.

За 4000 час. отказало 50 изделий. Требуется определить  $p^*(t)$  и  $q^*(t)$  при  $t=4000$  час.

Задача 1.9. В течение 1000 час из 10 гироскопов отказало 2. За интервал времени 1000 - 1100 час. отказал еще один гироскоп. Требуется определить  $f^*(t)$ ,  $q^*(t)$  при  $t=1000$  час.

Задача 1.10. На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За первые 3000 час. отказало 80 ламп. За интервал времени 3000 - 4000 час. отказало еще 50 ламп. Требуется определить  $p^*(t)$  и  $q^*(t)$  при  $t=4000$  час.



Задача 1.11. На испытание поставлено 1000 изделий. За время  $t=1300$  час. вышло из строя 288 штук изделий. За последующий интервал времени 1300-1400 час. вышло из строя еще 13 изделий. Необходимо вычислить  $p^*(t)$  при  $t=1300$  час.

и  $t=1400$  час.;  $f^*(t)$ ,  $g^*(t)$  при  $t=1300$  час.

Задача 1.12. На испытание поставлено 45 изделий. За время  $t=60$  час. вышло из строя 35 штук изделий. За последующий интервал времени 60-65 час. вышло из строя еще 3 изделия. Необходимо вычислить  $p^*(t)$  при  $t=60$  час. и  $t=65$  час.;  $f^*(t)$ ,  $g^*(t)$  при  $t=60$  час.

Задача 1.13. В результате наблюдения за 45 образцами радиоэлектронного оборудования, которые прошли предварительную 80-часовую приработку, получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенные в табл.1.2. Необходимо определить  $m_t^*$ .

Таблица 1.2.

$t_i$ , час.	$n_i$	$t_i$ , час.	$n_i$	$t_i$ , час.	$n_i$
0-10	19	30-40	3	60-70	1
10-20	13	40-50	0		
20-30	8	50-60	1		

Задача 1.14. На испытание поставлено 8 однотипных изделий. Получены следующие значения  $t_i$  ( $t_i$  - время безотказной работы  $i$ -го изделия):

$t_1=560$  час.;  $t_2=700$  час.;  $t_3=800$  час.;  $t_4=650$  час.;  $t_5=580$  час.;  $t_6=760$  час.;  $t_7=920$  час.;  $t_8=850$  час. Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

Задача 1.15. За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зарегистрировано 6 отказов. Время восстановления составило:  $t_1=15$  мин.;  $t_2=20$  мин.;  $t_3=10$  мин.;  $t_4=28$  мин.;  $t_5=22$  мин.;  $t_6=30$  мин.

Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры  $m_{\text{вс}}^*$ .

Задача 1.16. На испытание поставлено 1000 изделий. За время  $t=11000$  час.

вышло из строя 410 изделий. За последующий интервал времени 11000-12000 час. вышло из строя еще 40 изделий. Необходимо вычислить  $p^*(t)$  при  $t=11000$  час. и  $t=12000$  час., а также  $f^*(t)$ ,  $g^*(t)$  при  $t=11000$

## 2.3. (6 ЧАСОВ). ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

### Теоретические сведения

Соединение элементов называется последовательным, если отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. Система последовательно соединенных элементов работоспособна тогда, когда работоспособны все ее элементы.

Вероятность безотказной работы системы за время  $t$  определяется формулой

$$P_c(t) = P_1(t) * P_2(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (3.1) \quad \text{где } P_i(t) - \text{вероятность безотказной работы } i\text{-го элемента за время } t.$$

1. Заготовки поступают от двух цехов предприятия: 60% от цеха №1 и 40% от цеха №2. Заготовки первого цеха содержат 5% брака, а второго - 3%. Найти вероятность того, что наугад взятая заготовка будет бракованной.

*Решение:*

Вероятность того, что наугад взятая заготовка цеха №1 будет бракованной равна 0,05 ( $P_1$ ). Вероятность того, что наугад взятая заготовка цеха №2 будет бракованной равна 0,03 ( $P_2$ ).

Вероятность того, что наугад взятая заготовка предприятия будет бракованной равна:

$$P = P_1 * 0,6 + P_2 * 0,4 = 0,05 * 0,6 + 0,03 * 0,4 = 0,042$$

2. Объект состоит из пяти крупных деталей. Вероятность брака при изготовлении каждой детали составляет 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05 соответственно. Какова вероятность того, что изделие окажется бракованным?

*Решение:* Вероятность того, что наугад взятая деталь годная равна 0,99; 0,98; 0,97; 0,96; 0,95. Вероятность того, изделие годное равно :  $P = 0,99 * 0,98 * 0,97 * 0,96 * 0,95 = 0,858$

3. Вероятность безотказной работы блока питания 0,9. Для повышения надежности устанавливают такой же резервный блок. Определить вероятность безотказной работы устройства с учетом резервного блока?

*Решение:* Вероятность того, что выхода из строя блока питания равна 0,1 ( $P_1$ ). Вероятность того, что выхода из строя резервного блока питания равна 0,1 ( $P_2$ ). Вероятность выхода из строя блоков одновременно равна  $P = 0,1 * 0,1 = 0,01$ . Вероятность безотказной работы устройства равна  $1 - P = 0,99$

4. В партии подшипников 95% отвечают стандарту. Контроль признает пригодным стандартный подшипник с вероятностью 0,98 и нестандартный с вероятностью 0,03. Определить вероятность того, что подшипник, прошедший контроль, отвечает стандарту.

*Решение:* Из 10000 подшипников 9500 отвечают стандарту. После контроля из 9500 подшипников признаны годными  $9500 * 0,98 = 9310$  подшипник. А из 500 нестандартных подшипников признано годными  $500 * 0,03 = 15$  подшипников.

Таким образом, количество подшипников, прошедших контроль, составляет 9325. Из них стандартных 9310. Вероятность того, что подшипник, прошедший контроль, отвечает стандарту, равна  $9310/9325 = 0,9984$ .

$$1 - (1 - 0,95) * (1 - 0,98) + 0,03 * (1 - 0,98) = 0,9984$$

### **Решение типовых задач.**

Задача 3.1. Устройства сигнализации производятся тремя фирмами. Устройства первой фирмы установлены на 43% машин; устройства второй фирмы установлены на 28% машин; устройства третьей фирмы установлены на 29% машин. Надежность устройства, изготовленного первой фирмой равна 0,9; второй фирмой - 0,85, третьей фирмой – 0,95. Какова надежность устройства сигнализации произвольно выбранной машины.

Задача 3.2. Устройство состоит из 1000 элементов, работающих независимо друг от друга. Вероятность отказа в течение первых 10 минут работы любого из элементов равна 0,003. Найти вероятность того, что в течение первых 10 минут откажут 3 элемента.

Задача 3.2. Устройство состоит из 3000 элементов, работающих независимо друг от друга. Вероятность отказа в течение первых 30 минут работы любого из элементов равна 0,001. Найти вероятность того, что в течение первых 30 минут откажут 3 элемента.