



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ДГТУ)**

Составитель

профессор к.т.н. Решенкин А.С.

## **Учебно-методические материалы лекционного курса**

по дисциплине «Надежность технических систем»

Ростов-на-Дону 2017

Вводная лекция по дисциплине  
**«Надежность технических систем»**

## **Учебные вопросы:**

1. Предмет, цели и задачи дисциплины
2. Этапы развития работ в области надежности

## 1. Предмет, цели и задачи дисциплины

**Теория надежности** не разрабатывает методы и средства поиска неисправностей в данном объекте — она располагает методами, позволяющими определять (на основе анализа статистической информации) вероятность возникновения отказов в совокупности одинаковых объектов.

***Техническая диагностика*** располагает методами, с помощью которых можно оценить состояние конкретного объекта. Вместе с тем многие задачи диагностики решаются на основе теории надежности.

В структуру **теории надежности** входят разделы, которые могут изучаться как самостоятельные дисциплины:

- математическая теория надежности;
- физическая теория надежности (физика отказов);
- прогнозирование работоспособности;
- диагностика технического состояния;
- теория контроля показателей надежности;
- теория восстановления работоспособности.

Любые технические устройства всегда изготавливали в расчете на некоторый достаточный для практических целей период экономически эффективного использования. Однако долгое время надежность не измеряли количественно, что значительно затрудняло ее объективную оценку.

Для оценки надежности использовали такие понятия, как «высокая надежность», «низкая надежность» и другие качественные определения.

Установление количественных показателей надежности и способов их измерения и расчета положило начало научным методам в исследовании надежности.

## 2. Этапы развития работ в области надежности

В нашей стране проблема надежности машин в концептуальном аспекте впервые была выдвинута и обсуждена на сессии Академии наук СССР в 1934 г.

На первых этапах развития теории надежности основное внимание было сосредоточено на сборе и обработке статистических данных об отказах изделий. В оценке надежности преобладал характер констатации количественных характеристик потока отказов на основании статистических данных.

Развитие теории надежности сопровождалось совершенствованием вероятностных методов исследования, таких как определение законов распределений наработок до отказа, разработка методов расчета и испытаний изделий с учетом случайного характера отказов и т. п.

Увеличивающаяся сложность технических устройств, возрастающая ответственность функций, выполняемых техническими системами, повышение требований к качеству изделий и условиям их работы, возросшая роль автоматизации управления техническими объектами — основные факторы, определившие главное направление в развитии науки о надежности.

Машины становятся все более сложными, состоящими из десятков тысяч элементов. Если не принимать специальные меры по обеспечению надежности, любая машина практически окажется неработоспособной.

Круг вопросов, входящих в компетенцию теории надежности, наиболее полно сформулировал академик А. И. Берг:

**Теория надежности** устанавливает закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности системы и ее элементов, рассматривает влияние внешних и внутренних воздействий на процессы в системах, создает основы расчета надежности и предсказания отказов, изыскивает способы повышения надежности при конструировании и изготовлении систем и их элементов, а также способы сохранения надежности при эксплуатации.

Этапы развития работ в области надежности некоторые зарубежные специалисты подразделяют на три этапа:

**Первый этап** - «карандашно-бумажный».

В этот период выполняли статистико-вероятностные описания наработок до отказа, основанные на экспоненциальном законе их распределения.

Моменты наступления отказа и их причины рассматривали как случайные события, обладающие фатальной неизбежностью, в отрыве от причин, вызывающих появление отказов.

**Второй этап** - характеризовался широким развитием работ по экспериментальной оценке фактической надежности, сбору и обработке эксплуатационной информации о надежности. В результате осуществленных на этом этапе работ была пересмотрена концепция случайности причин отказов и их неизбежности, были объяснены многие случайные отказы и установлена взаимосвязь между конструкцией изделия, технологией изготовления и причинами отказов.

Информация о надежности изделий стала более полной, что позволило внести значительную ясность в сущность отказов.

**Третий этап** - характеризуется как дальнейшим развитием математической теории надежности, так и сближением этой науки с техническими дисциплинами, приданием надежности инженерной направленности.

Большинству работ на этом этапе присущи следующие принципы:

- отказ от концепции случайности причин отказов и их неизбежности и связь отказов с конструктивно-технологическими факторами;
- необходимость установления причин отказов, а не только констатация их случаев и числа;
- отсутствие направленности методов промышленного контроля, действующих на предприятиях, на выявление дефектов, приводящих к отказам;
- необходимость повсеместного перехода на контроль надежности в условиях изготовления.

Современным концепциям организации работ в области надежности в большинстве стран придается конкретная практическая направленность. Так, в Японии издано специальное руководство для директоров фирм, в котором определен состав конкретных мероприятий при проведении работ в области надежности:

- анализ причин отказов изделий-аналогов;
- использование стандартизованных элементов;
- упрощение конструкции системы (изделия);
- устранение ошибок при конструировании и изготовлении;
- постоянное изучение достигнутого уровня надежности;
- обеспечение требуемого уровня надежности комплектующих элементов;
- использование резервирования;
- обеспечение легкости осмотра и технического обслуживания;
- четкая регламентация в технических условиях режимов эксплуатации и функциональных ограничений;
- установление условий хранения и максимально допустимой длительности хранения;
- выбор необходимой упаковки, учитывающей удары и вибрации при транспортировании;
- выбор субподрядчиков, поставляющих продукцию гарантированного качества, и контроль за их деятельностью;
- учет времени выполнения изделием своих функций и регламентация допускаемого срока использования изделия;
- точное соблюдение регламента технических обслуживаний.

## Отработка на надежность серийно изготавливаемых изделий должна включать в себя:

- организацию сбора и обработки информации о надежности изделий в процессе эксплуатации;
- организацию анализа рекламаций, претензий потребителей и данных служб гарантийного ремонта;
- выявление составных частей, лимитирующих надежность изделий (слабых элементов);
- установление причин отказов и повторяемости каждого из них;
- выявление технологических параметров, оказывающих решающее влияние на надежность изделий и их комплектующих;
- разработку и реализацию мероприятий по устранению причин наиболее часто повторяющихся отказов.

Следует отметить, что теоретические и практические исследования в области надежности развивались по двум основным направлениям:

**Первое** направление связано с развитием математических методов оценки надежности, особенно применительно к сложным системам.

В этом случае на основе статистической обработки результатов наблюдений за отказами разрабатывают методы, обеспечивающие высокий уровень надежности путем оптимизации структуры сложной системы.

Это направление возникло в радиоэлектронике.

**Второе направление** связано с изучением физических процессов старения (изнашивания, усталостного разрушения, коррозии, кавитации и др.). В этом случае разрабатывают соответствующие методы расчета на долговечность и применяют технологические способы, обеспечивающие необходимую надежность конструктивных элементов. Это направление возникло в машиностроении.

Термин **«диагностика»** происходит от греческого слова *diagnosticos* — способный распознавать.

В настоящее время большинство исследователей определяют диагностику как науку о формах проявления отказов, методах и средствах определения технического состояния и прогнозирования ресурса работы технических устройств без их разборки.

Диагностика включает в себя контроль технического состояния автомобиля, прогноз ресурса его безотказной работы и заключение о необходимых технических воздействиях на механизм.

**Контроль** состоит в сравнении показателей технического состояния механизма, выраженных диагностическими сигналами, с нормативами. На основании этого выявляют неисправности механизмов.

**Прогноз ресурса** — это определение возможности пробега автомобиля до очередной диагностики. Задача прогноза ресурса сводится к экстраполяции закономерности изменения работоспособности объекта до достижения им предельного состояния, обусловленного технико-экономической целесообразностью дальнейшего использования.

**Заключение** включает в себя перечень необходимых воздействий на механизм как ремонтного (по результатам контроля), так и профилактического (по результатам прогноза) характера.

# **Лекция № 2**

Тема: “Объекты, рассматриваемые в области  
надежности ”

## *Учебные вопросы:*

1. Общие понятия.
2. Классификация технических систем. Основные состояния объекта (технической системы)

**В теории надежности используют понятия:**

- «объект»
- «элемент»
- «система»

**а также другие обобщающие многочисленные понятия, встречающиеся в технике, например:**

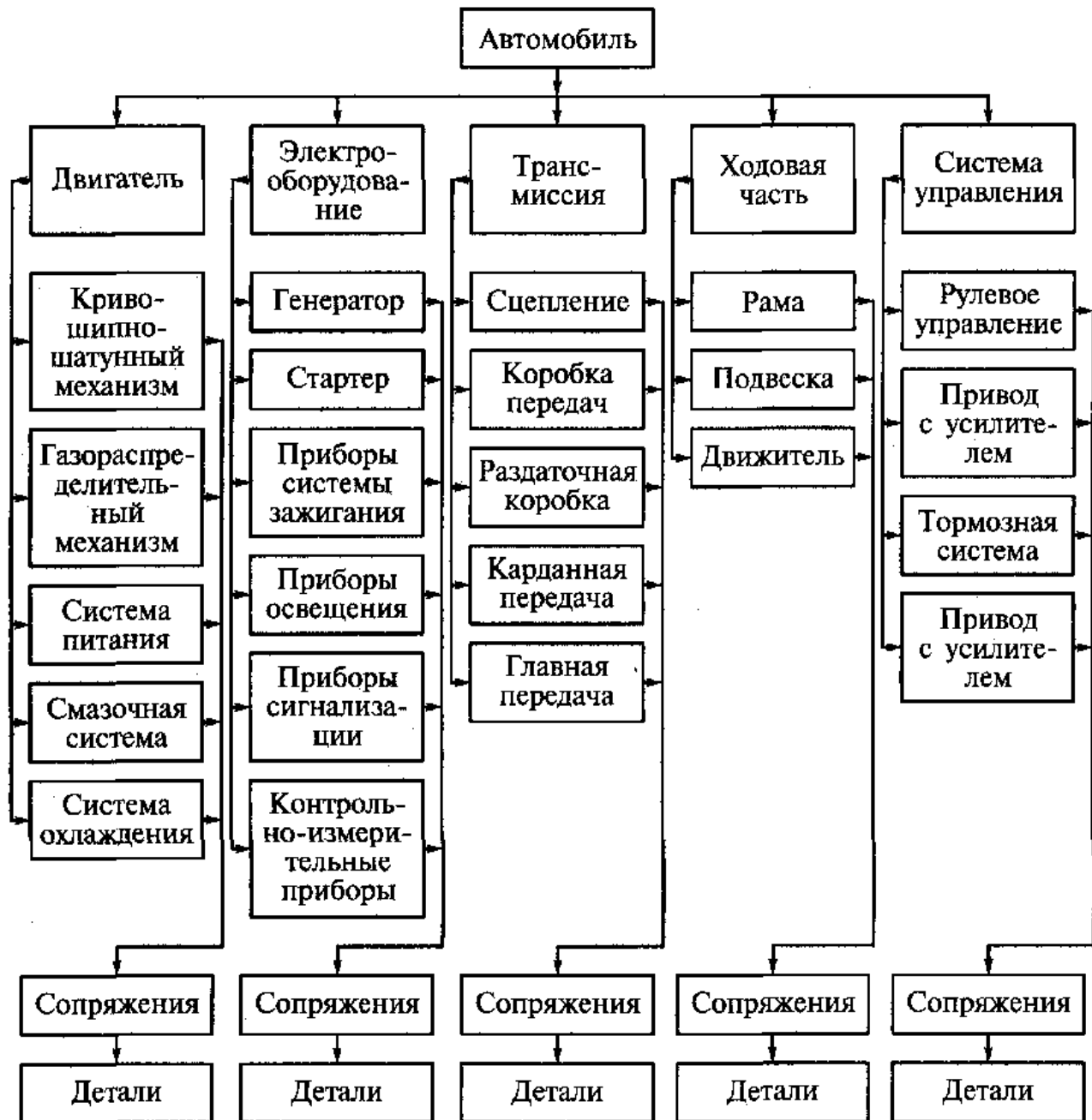
- «автомобиль»
- «машина»
- «агрегат»
- «узел»
- «деталь»
- «изделие» и др.

**Основной задачей** теории надежности является изучение закономерностей возникновения отказов и неисправностей объекта и на базе результатов исследований — разработка мероприятий, направленных на обеспечение выполнения объектом заданных функций с наименьшими затратами.

Используемый в тексте термин **«объект»** является наиболее общим наименованием изделия, например автомобиля, оборудования или отдельной сборочной единицы.

Объект, предназначенный для самостоятельного выполнения заданных функций, будем называть **системой**.

Любая система состоит из **элементов**.  
 Например, автомобиль как техническая система включает в себя следующие элементы:  
 Двигатель  
 Трансмиссию  
 Ходовую часть  
 Электрооборудование  
 Системы управления и др.



## Технические системы могут быть:

- Невосстанавливаемыми
- Восстанавливаемыми
- Длительного времени работы
- Короткого времени работы
- Резервированными
- Нерезервированными.

Техническую систему называют **невосстанавливаемой** (неремонтируемой), если ее отказ приводит к неустранимым последствиям и систему нельзя использовать по своему назначению.

Работа после отказа невосстанавливаемой системы считается невозможной или нецелесообразной.

Под **восстанавливаемой** (ремонтируемой) понимают систему, которая может продолжать выполнение своих функций после устранения отказа, вызвавшего прекращение ее функционирования.

Работа восстанавливаемой системы после отказа может быть возобновлена в результате проведения необходимых восстановительных работ.

Существуют системы смешанного типа, у которых часть элементов может восстанавливаться, а другая — нет.

В зависимости от выполняемых функций различают **системы длительного и системы короткого времени работы.**

**Резервированием** (redundancy) называют способ повышения надежности путем включения резервных единиц, способных в случае отказа основного устройства выполнять его функции. Этот метод обладает большими возможностями получения заданных уровней надежности и имеет широкое практическое применение.

В процессе эксплуатации объект может находиться в одном из следующих состояний: исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном и предельном.

***Исправное состояние*** (исправность, good state) — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и(или) конструкторской (проектной) документации.

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

Различают неисправности, не приводящие к отказам (нарушение лакокрасочного покрытия, износ протектора колеса), и неисправности, ведущие к возникновению отказа (трещина металлоконструкции рамы, изгиб лопасти вентилятора системы охлаждения двигателя).

***Работоспособное***

***состояние***

(работоспособность, up state) — состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

***Неработоспособное состояние*** (down state) — состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособность и неработоспособность в общем случае могут быть **полными** или **частичными**. Полностью работоспособный объект обеспечивает в определенных условиях максимальную эффективность его применения.

Эффективность применения частично работоспособного объекта меньше максимально возможной, но значения ее показателей при этом еще находятся в пределах, установленных для такого функционирования, которое считается нормальным. Частично неработоспособный объект может функционировать, но уровень эффективности при этом ниже допустимого.

Полностью неработоспособный объект применять по назначению невозможно.

**Предельное состояние объекта** (limiting state) — состояние, при котором дальнейшая его эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

В этом случае эксплуатацию прекращают из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого ухода заданных параметров за установленные пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой.

Автомобиль, достигший своего предельного состояния, направляют в капитальный ремонт или списывают.

Для восстанавливаемых объектов (автомобилей) переход в предельное состояние определяется наступлением момента, когда дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна вследствие следующих причин:

- становится невозможным поддержание его безопасности, безотказности или *эффективности* на минимально допустимом уровне;
- в результате изнашивания и (или) старения объект пришел в такое состояние, при котором ремонт требует недопустимо больших затрат или не обеспечивает необходимой степени восстановления исправности или ресурса.

# **Лекция № 3**

Тема: “Виды и характеристика отказов  
технических систем”

## *Учебные вопросы:*

1. Переход объекта в различные состояния.
2. Способы устранения отказа

Переход изделия из работоспособного состояния в неработоспособное осуществляется при наступлении такого события, как отказ.

**Повреждение** (damage) — событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении его работоспособности.

**Отказ** (failure) — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

**Критерий отказа** (failure criterion) — признак или нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и(или) конструкторской документации.

**Восстановление** (restoration, recovery) — это процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния.

**Авария** — событие, заключающееся в переходе объекта с одного уровня работоспособности или относительного уровня функционирования на другой, существенно более низкий, с крупным нарушением режима работы объекта. Авария может привести к частичному или полному разрушению объекта, созданию опасных условий для человека и окружающей среды.

## Классификация отказов

Признак	Вид отказа
Значимость	Критический Существенный Несущественный
Зависимость	Зависимый Независимый
Характер возникновения	Внезапный Постепенный
Характер обнаружения	Явный Скрытый
Причина возникновения	Конструктивный Производственный Эксплуатационный Деградационный

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

**Скрытый отказ** (latent failure) — отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

**Сбой** (Interruption) — самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

**Ресурсный отказ** (marginal failure) — отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

**Независимый отказ** (primary failure) — отказ, не обусловленный другими отказами.

**Зависимый отказ** (secondary failure) — отказ, обусловленный другими отказами.

**В зависимости от причин возникновения отказа различают:**

**Конструктивные отказы** (design failure), возникшие в результате нарушения установленных правил конструирования;

**Производственные отказы** (manufacturing failure), причиной возникновения которых является нарушение установленного процесса изготовления или ремонта изделия;

**Эксплуатационные отказы** (misuse failure, mishandling failure), причиной возникновения которых является нарушение установленных правил или условий эксплуатации машины.

**Деградационный отказ** (wear-out failure, ageing failure) — отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

По своей природе отказы могут быть:

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

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

По характеру возникновения различают отказы внезапные, постепенные и перемежающиеся.

**Внезапный отказ** (sudden failure) характеризуется резким изменением одного или нескольких заданных параметров объекта. Примером внезапного отказа является нарушение работоспособности системы зажигания или системы питания двигателя.

**Постепенный отказ** (gradual failure) характеризуется постепенным изменением одного или нескольких заданных параметров объекта. Характерным примером постепенного отказа является нарушение работоспособности тормозов в результате износа фрикционных элементов.

**Перемежающийся отказ** (intermittent failure) — многократно возникающий сбой одного и того же характера. Примером перемежающегося отказа может служить ухудшение мощностных и топливно-экономических показателей двигателя из-за появления нагара в головке блока цилиндров. Этот отказ часто самоустраняется при длительной работе машины в тяжелом нагрузочном режиме. Другим характерным примером перемежающегося отказа является временное нарушение работоспособности двигателя из-за случайного попадания воды в бензин.

По возможности дальнейшего использования объекта отказы могут быть **полные** или **частичные**.

**Полный отказ** исключает возможность работы объекта до его устранения.

При возникновении **частичного отказа** объект может частично использоваться.

По признаку легкости обнаружения отказы бывают **очевидные** (явные) и **скрытые** (неявные).

По времени возникновения отказы подразделяются на **приработочные**, возникающие в начальный период эксплуатации, **отказы при нормальной эксплуатации, износосовые отказы**, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и т.п.

## Перечень характерных отказов автомобиля и его элементов

Характер отказа	Пример отказавших элементов
Износ	Рабочие органы, поверхности деталей в сопряжениях
Излом	Элементы металлоконструкций
Трещина	Рамы несущих конструкций
Срез резьбы	Резьбовые соединения
Потеря упругости	Пружины
Разрыв	Шланги, трубопроводы, ремни, цепи
Расслоение, растрескивание	Ремни, шланги
Нарушение герметичности	Гидравлические и пневматические системы
Пробоина	Баки
Потеря эластичности, старение	Резинотехнические изделия, уплотнения
Пробой, замыкание, нарушение контакта, электрические повреждения, подгорания	Элементы электропривода
Перегорание	Осветительная аппаратура
Несрабатывание	Приборы защиты и управления, элементы систем автоматики
Коррозия	Поверхности металлоконструкций

# Лекция № 4

Тема: “Показатели надежности”

**Показатель надежности** (reliability measure) — количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

Значения показателей надежности могут быть нормативными и фактическими и определяться расчетным методом (**расчетный показатель надежности**), по данным испытаний (**экспериментальный показатель**), по данным эксплуатации (**эксплуатационный показатель**) или путем экстраполирования (**экстраполированный показатель**).

Для показателей надежности используются две формы представления: **вероятностная и статистическая**.

**Вероятностная** форма обычно бывает удобнее при априорных аналитических расчетах надежности.

**Статистическая** — при экспериментальном исследовании надежности технических систем. Кроме того, оказывается, что одни показатели лучше интерпретируются в вероятностных терминах, а другие — в статистических.

## Классификация показателей надежности

Признак	Показатель
Число характеризующих свойств надежности	Единичный Комплексный
Свойство надежности	Безотказность Долговечность Сохраняемость Ремонтопригодность
Метод получения	Расчетный Экспериментальный Эксплуатационный Экстраполированный
Область использования	Нормативный Оценочный
Область распространения	Индивидуальный Групповой

**Существуют комплексные показатели, характеризующие несколько свойств, составляющих надежность объекта.**

***Единичный показатель надежности* (simple reliability measure) — показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта.**

***Комплексный показатель надежности* (integrated reliability measure) — показатель надежности, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность объекта.**

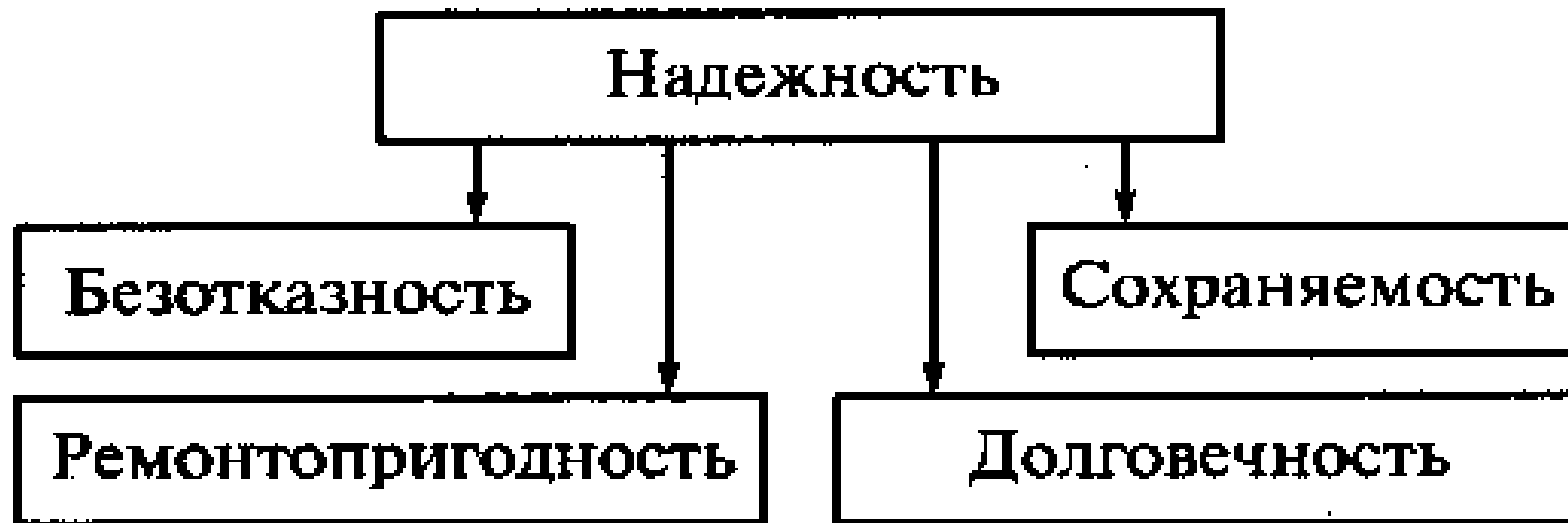
**Расчетный показатель надежности** (predicted reliability measure) — показатель надежности, значения которого определяются расчетным методом.

**Экспериментальный показатель надежности** (assessed reliability measure) — показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным испытаний.

**Эксплуатационный показатель надежности** (observed reliability measure) — показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации.

**Экстраполированный показатель надежности** (extrapolated reliability measure) — показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

## Классификация свойств надежности машин и их элементов



Надежность в общем случае — комплексное свойство, включающее такие понятия, как **безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость**.

Для конкретных объектов и условий их эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость.

**Безотказность** (reliability, failure-free operation) — это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

**Ремонтпригодность** (maintainability) — это свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности состояния путем технического обслуживания и ремонта.

**Долговечность** (durability, longevity) — это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

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

По области использования показатели надежности могут подразделяться на **нормативные и оценочные**.

**Нормативными** называют показатели надежности, регламентированные в нормативно-технической или конструкторской документации.

К **оценочным** относятся показатели, используемые для различных сравнительных оценок при научно-исследовательских и проектно-технологических разработках. К оценочным относятся фактические значения показателей надежности опытных образцов и серийной продукции, получаемые по результатам испытаний по данным эксплуатации.

По области распространения показатели надежности подразделяются на **индивидуальные** и **групповые**.

К **индивидуальным** относятся такие показатели надежности, используя которые можно по результатам испытаний или эксплуатации делать вывод о соответствии или не соответствии данного объекта регламентированным требованиям по надежности.

Показатели, на основе которых вывод о соответствии регламентированным требованиям можно делать только относительно некоторой совокупности (партии) изделий, называют **групповыми**. Как правило, индивидуальные показатели надежности являются одновременно и нормативными.

# Номенклатура показателей надежности

Характеризуемые свойства надежности	Показатель	Обозначение
<b>Единичные:</b>  безотказность          долговечность          сохраняемость          ремонтпригодность	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
	Интенсивность отказов	$\lambda(t)$
	Установленная безотказная наработка	$T_y$
	Средняя наработка на отказ	$T_o$
	Средняя наработка до отказа	$T_{cp}$
	Параметр потока отказов	$\omega(t)$
	Гамма-процентная наработка до отказа	$T_\gamma$
	Средний ресурс	$T_p$
	Гамма-процентный ресурс	$T_{p\gamma}$
	Назначенный ресурс	$T_{p.n}$
	Установленный ресурс (ресурс)	$T_{p.y}$
	Средний срок службы	$T_{cl}$
	Гамма-процентный срок службы	$T_\gamma$
	Назначенный срок службы	$T_{cl.n}$
	Установленный срок службы (срок службы)	$T_{cl.y}$
	Средний срок сохраняемости	$T_c$
	Гамма-процентный срок сохраняемости	$T_{c\gamma}$
	Назначенный срок хранения	$T_{c.n}$
	Установленный срок сохраняемости (срок сохраняемости)	$T_{c.y}$
	Среднее время восстановления работоспособного состояния	$T_v$
	Вероятность восстановления работоспособного состояния	$P_v(t)$
Комплексные	Коэффициент сохранения эффективности	$K_{эф}$
	Коэффициент оперативной готовности	$K_{o.g}$
	Коэффициент технического использования	$K_{т.и}$
	Коэффициент готовности	$K_T$
	Удельная суммарная трудоемкость технических обслуживаний	$S$
	Удельная суммарная трудоемкость ремонтов	$S_{т.о} (S_p)$

# Лекция № 5

**Тема: «Сбор, анализ и обработка  
эксплуатационных данных о надежности  
изделий»**

## **Учебные вопросы:**

1. Цели и задачи сбора информации и оценки надежности машин
2. Принципы сбора и систематизации эксплуатационной информации о надежности изделий
3. Построение эмпирического распределения и статистическая оценка его параметров

## 1. Цели и задачи сбора информации и оценки надежности машин

**Надежность** машин и оборудования оценивают для определения их соответствия установленным требованиям путем сопоставления показателей долговечности, безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости исследуемого изделия с аналогичными показателями эталонного изделия.

Основной **целью** сбора информации является своевременное обеспечение полных, объективных и достоверных данных о надежности машин и их элементов в эксплуатации.

Необходимым условием достижения поставленной цели является организация четкой системы сбора и обработки информации о надежности.

Система сбора и обработки информации о надежности должна обеспечить:

1. своевременное получение полных, сопоставимых и объективных данных о надежности машин, работающих в различных условиях эксплуатации;
2. оперативную обработку статистических данных и представление результатов в форме, наиболее удобной для анализа надежности машин;
3. учет и координацию мероприятий по повышению надежности, проводимых разработчиками, заводами-изготовителями и эксплуатационными организациями.

Характерной чертой эксплуатации машин является их использование в различных климатических зонах, дорожных условиях и при производстве работ различных видов. Срок службы основных элементов машин достаточно велик и составляет **5—10 лет.**

## **Результаты сбора и обработки информации о надежности машин и оборудования должны обеспечить возможность решения следующих задач:**

1. нахождение причин возникновения отказов и неисправностей;
2. выявление деталей, сборочных единиц и комплектующих изделий, лимитирующих надежность машин;
3. установление и корректировку нормируемых показателей надежности машин и их элементов;
4. обоснование норм расхода запасных частей, структуры ремонтного цикла и периодичности проведения технического обслуживания и ремонтов машин;
5. выявление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность машин;
6. определение экономической эффективности мероприятий по повышению надежности машин и их элементов.

Основным источником информации о надежности автомобилей является специально организуемая *подконтрольная эксплуатация* или испытания в максимально приближенных к эксплуатационным условиям, оговоренных в нормативно-технической документации.

**Подконтрольной эксплуатацией** называют эксплуатацию заданного числа машин в строгом соответствии с требованиями технической документации, сопровождаемую контролем технического состояния основных элементов каждой машины специально подготовленным персоналом.

## **2. Принципы сбора и систематизации эксплуатационной информации о надежности изделий**

Для всесторонней оценки надежности машин необходимо в результате сбора информации получить полные сведения об объекте исследования, условиях его эксплуатации, характере отказов и способах их устранения.

Основные сведения о машине приведены в техническом паспорте:

- марка
- завод-изготовитель
- заводской номер
- время изготовления
- Категория
- наработка до начала наблюдений

Каждый отказ машины в процессе наблюдений должен характеризоваться такими данными, как:

- наработка элемента до отказа
- дата появления отказа
- наименование или номер отказавшего элемента
- характер и внешнее проявление отказа
- предполагаемая причина его возникновения
- способ и время устранения отказа.

В общем случае для сбора и обработки информации о надежности предусмотрены следующие виды форм учетной документации:

- первичные формы учета эксплуатационной информации;
- формы-накопители эксплуатационной информации;
- формы записи результатов анализа надежности.

В зависимости от организации использования машин и ухода за их техническим состоянием различают:

- подконтрольную эксплуатацию
- нормальную эксплуатацию
- рядовую эксплуатацию

**Нормальной эксплуатацией** называют эксплуатацию, при которой соблюдают правила использования машин и ухода за ними, оговоренные в технической документации.

**Рядовой эксплуатацией** называют эксплуатацию, проводимую с отклонениями от требований технической документации, вызванными, например, необходимостью проведения работ в сжатые сроки или в особо сложных условиях.

Основными методами сбора информации о надежности машин в эксплуатации являются:

- инструментальный метод;
- метод хронометража;
- метод периодических наблюдений;
- метод, основанный на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации.

**Инструментальный метод** позволяет получить объективную информацию в наиболее полном объеме.

Информацию этим методом собирают, как правило, в условиях подконтрольной эксплуатации при испытаниях машин. В качестве технических средств сбора информации используют контрольно-измерительную аппаратуру и самопишущие приборы, устанавливаемые на исследуемой машине.

**Метод хронометража** используют для определения чистого времени работы элементов машины.

Суть метода заключается в том, что специалист-хронометрист с помощью секундомера фиксирует моменты начала и окончания работы машины или отдельных ее элементов.

Для этого можно также использовать приборы, автоматически регистрирующие наработку исследуемых элементов машины.

## ***Метод периодических наблюдений***

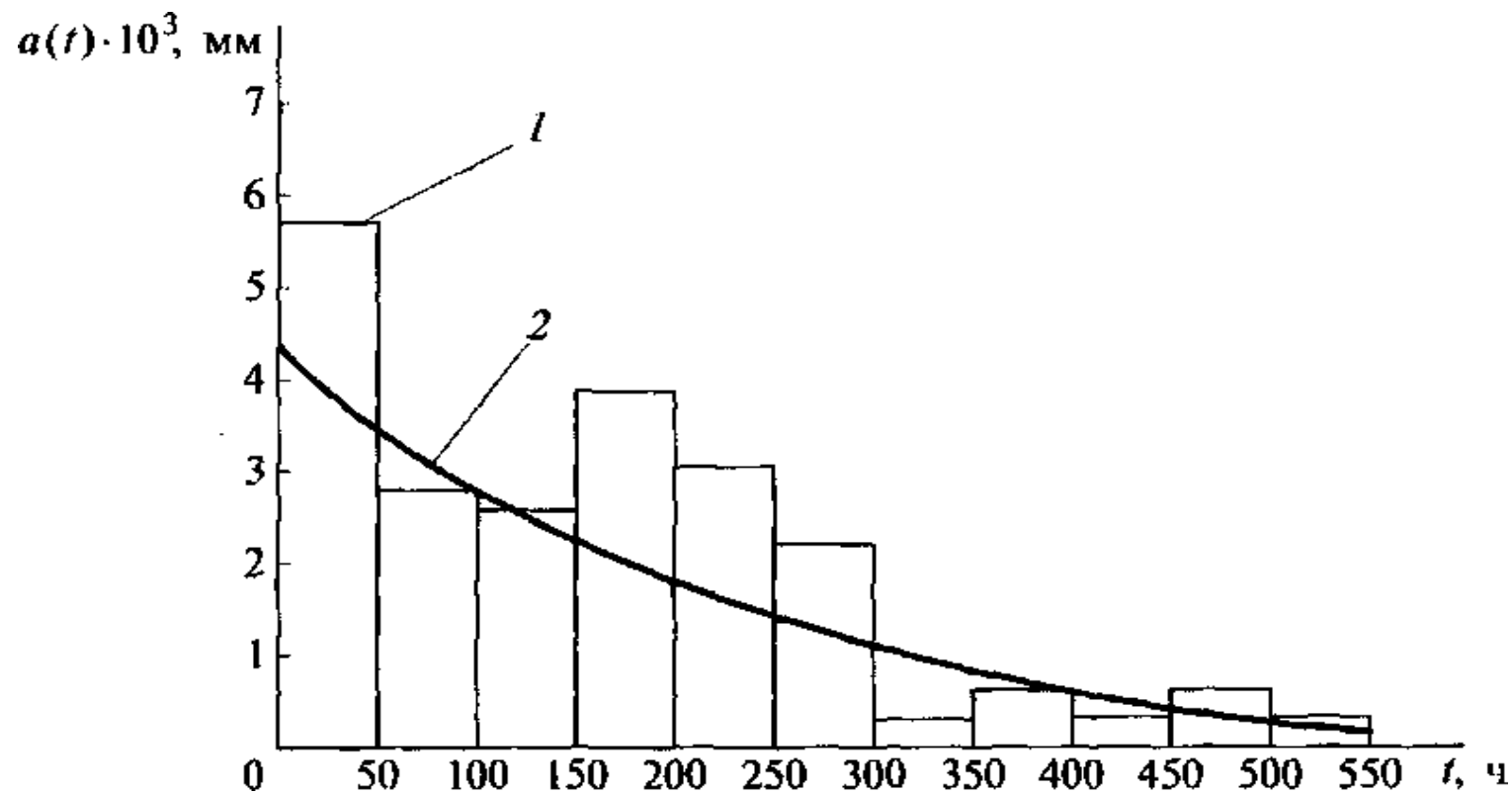
применяют в тех случаях, когда установить постоянное наблюдение за машиной (или группой машин) невозможно из-за удаленности объекта.

Собирают информацию в этом случае на основании опроса водителей и результатов технической экспертизы, проводимой на автомобиле.

**Метод сбора информации, основанный на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации**, применяют весьма широко.

При условии добросовестного заполнения технической документации и содержания ее в образцовом порядке с помощью этого метода можно получить исходные данные для определения всех основных нормируемых показателей надежности.

### 3. Построение эмпирического распределения и статистическая оценка его параметров



Статистическая функция плотности эмпирического распределения:

**1 — гистограмма распределения случайной величины;**

**2 — кривая распределения случайной величины**

Каждой числовой характеристике случайной величины соответствует ее статистический аналог. Статистические аналоги будем обозначать теми же буквами, что и соответствующие числовые характеристики, но со звездочкой.

Для математического ожидания таким аналогом является среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины

$$T'_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$$

где  $t_i$  —  $i$ -е значение случайной величины;  
 $N$  — общее число значений.

Для статистического ряда среднее арифметическое находится из выражения

$$T'_{cp} = \sum_{i=1}^N P_i^* \overline{t}_i$$

где  $P_i^*$  — частота,  $P_i^* = n/N$ ;  
 $\overline{t}_i$  — значение, соответствующее середине  $i$ -го интервала;  $n_i$  — число отказов.

Для характеристики рассеяния таким аналогом является статистическая дисперсия случайной величины

$$D^*(t) = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - T^*)^2}{N-1}$$

или статическое среднее квадратичное отклонение

$$\sigma^*(t) = \sqrt{D^*(t)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - T^*)^2}{N-1}}$$

для статистического ряда

$$\sigma^*(t) = \sqrt{\sum (t_i - T^*)^2 P_i^*}$$

Статистический коэффициент вариации определяется по формуле

$$V^* = \frac{\sigma^*(t)}{T^*}$$

При дальнейшей обработке необходимо решить вопрос о том, как подобрать для данных статистического ряда теоретическую кривую распределения, выражающую лишь существенные черты материала, а не случайности, связанные с недостаточным объемом экспериментальных данных.

Вид теоретического распределения, как правило, зависит от процессов, влияющих на изменение случайной величины. В некоторых случаях он выбирается просто по внешнему виду гистограммы. Найденные параметры эмпирического распределения подставляют в функцию теоретического распределения и рассчитывают вероятности появления случайной величины в интервалах (теоретические расчеты). Проверка согласованности экспериментальной и выравнивающей кривых часто производится по критерию Пирсона (критерию  $\chi^2$ ).

$$\chi^2$$

Распределение дает возможность оценить степень согласия теоретического и статистического распределения.

По значениям  $t_i$  посредством таблицы нормального распределения устанавливают теоретические частоты. Критерий согласия находится с помощью зависимости

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

где  $k$  — число интервалов наработки;  $P_i$  — теоретическая частота случайной величины в интервале.

Результат определения критерия записывается в таблицу. Таким образом, схема применения критерия при оценке согласия теоретического и статистического распределения сводится к определению:

- меры расхождения (по формуле);
- числа степеней свободы  $r = r(S+1)$

где  $S$  — число параметров теоретического распределения;

- табличного значения вероятности согласия  $P$ .

# Лекция № 6

**Тема:** «Законы распределения времени наработки до отказа, наиболее часто используемые в теории надежности »

## **Учебные вопросы:**

1. Характеристика законов распределения
2. Доверительный интервал и доверительная вероятность

## ***Экспоненциальное, или показательное распределение.***

Экспоненциальным законом распределения можно аппроксимировать время безотказной работы большого числа элементов.

В первую очередь это относится к элементам радиоэлектронной аппаратуры, а также к машинам, эксплуатируемым в период после окончания приработки и до существенного проявления постепенных отказов. Экспоненциальное распределение применяется в областях, связанных с «временем жизни»:

в медицине — продолжительность жизни больных,

в надежности — продолжительность безотказной работы системы,

в психологии — время, затраченное на выполнение тестовых задач.

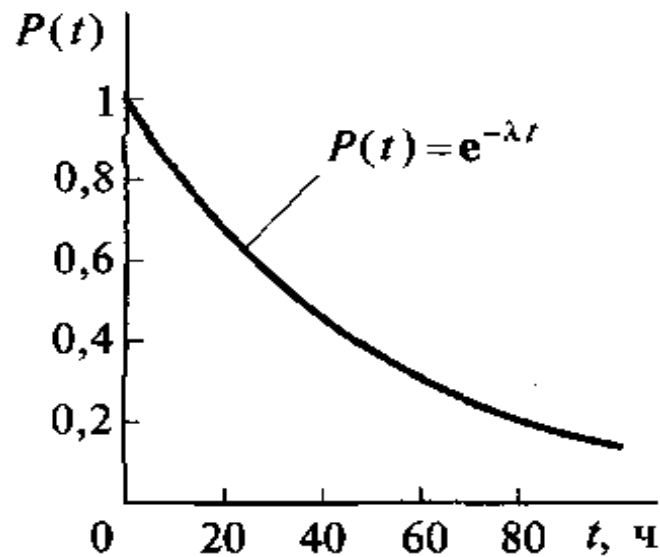
Оно используется в задачах массового обслуживания, в которых речь идет об интервалах времени между телефонными звонками, или между моментами поступления техники в ремонтную мастерскую, или между моментами обращения клиентов.

$$\Phi(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{при } t \geq 0$$

Это распределение имеет один параметр , где  $T_{cp}$  — средняя наработка элемента до отказа. Таким образом, параметр  $\lambda$  характеризует число отказов элемента в единицу времени и называется **интенсивностью отказов** (он имеет размерность времени).

Плотность экспоненциального распределения задается как  $f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$

Функция надежности  $P(t) = \lambda e^{-\lambda t}$  определяет вероятность безотказной работы за время  $t$ . В данном случае интенсивность отказов есть величина постоянная ( $\lambda(t)=\lambda$ ). Функция ресурса  $\Lambda(t)$  для экспоненциального распределения является линейной,  $\Lambda(t)=\lambda t$ .



Значение гамма-процентного ресурса определяется по формуле

$$T_{\rho\gamma} = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\gamma}{100}$$

Экспоненциальное распределение выделяется среди других распределений свойством «отсутствия памяти».

Пусть  $X$ — время службы некоторого изделия с экспоненциальным законом распределения. «Отсутствие памяти» означает, что изделие, проработавшее время  $t$ , имеет такое же распределение, что и новое, только что начавшее работу. Математически это свойство выражается в виде следующего равенства:

$$P(X > t + x | X > t) = P(X > x)$$

для любых  $t, x \geq 1$ .

Данное свойство как бы исключает износ и старение изделия.

**Числовые характеристики экспоненциального распределения выражаются через его параметр:**

математическое ожидание  $M(X) = 1/\lambda$ , дисперсия  $D(X) = \frac{1}{\lambda^2}$

среднее квадратическое отклонение  $\sigma(X) = \frac{1}{\lambda}$

При экспоненциальном законе отказов, между показателями надежности невосстанавливаемых систем существуют следующие зависимости:

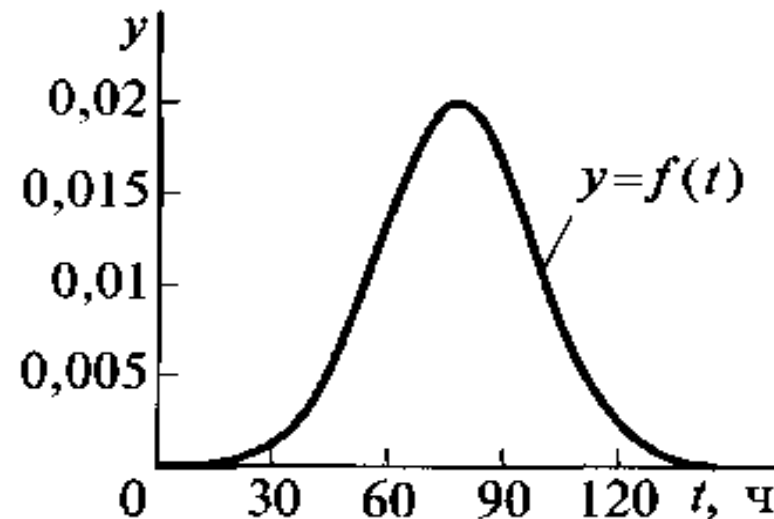
$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad T = \frac{1}{\lambda} \quad f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

## Нормальное распределение

**Нормальное распределение** (распределение Гаусса) определяется плотностью

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < t < +\infty$$

и зависит от двух параметров —  $m$  и  $\sigma$ , которые являются соответственно математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением времени безотказной работы элемента.



Согласно закону больших чисел распределение всегда подчиняется нормальному закону, если на изменение случайной величины оказывают влияние многие примерно равнозначные факторы.

Нормальному распределению подчиняются ошибки измерения деталей, отклонения дальности полета снарядов и т.п. При большом времени работы элемента и наличии восстановления среднее число отказов имеет асимптотически нормальное распределение.

Для нормального распределения функция надежности вычисляется по формуле

$$P(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)$$

$$\Phi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

- функция Лапласа, значения которой приведены в таблицах

Отметим важное **свойство** нормального распределения: сумма независимых случайных величин, имеющих нормальное распределение, также распределена по нормальному закону. При этом параметры суммы выражаются через параметры слагаемых: математическое ожидание суммы равно сумме математических ожиданий, дисперсия суммы равна сумме дисперсий.

## ***Усеченное нормальное распределение***

***Усеченное нормальное распределение*** получается из нормально-го при ограничении интервала изменения случайной величины на промежуток  $(0, +\infty)$ . Плотность распределения записывается так же, как для нормального распределения, но с коэффициентом пропорциональности  $c$ :

$$f(t) = \frac{c}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_0)^2}{2\sigma_0^2}}$$

Усеченное нормальное распределение зависит от двух параметров —  $m_0$  и  $\sigma_0$ , где  $m_0$  — значение случайной величины, соответствующее максимальному значению  $f(t)$  и называемое **модой**,  $\sigma_0$  — среднее квадратическое отклонение. Коэффициент  $c$  определяется из условия нормирования:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad \text{откуда} \quad c = \frac{1}{0,5 + \Phi_0\left(\frac{m_0}{\sigma_0}\right)}$$

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение усеченного нормального распределения определяются через параметры  $m_0$  и  $\sigma_0$  по формулам

$$m = m_0 + k\sigma_0; \quad \sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + k \frac{m_0}{\sigma_0} - k^2}$$

где

$$k = \frac{c}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{m_0^2}{2\sigma_0^2}}$$

## ***логарифмически-нормальное распределение***

В ***логарифмически-нормальном распределении*** логарифм случайной величины подчиняется нормальному закону с плотностью:

$$f(t) = \frac{1}{st\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2s^2}}$$

;

где  $\mu$  и  $s$  — параметры распределения.

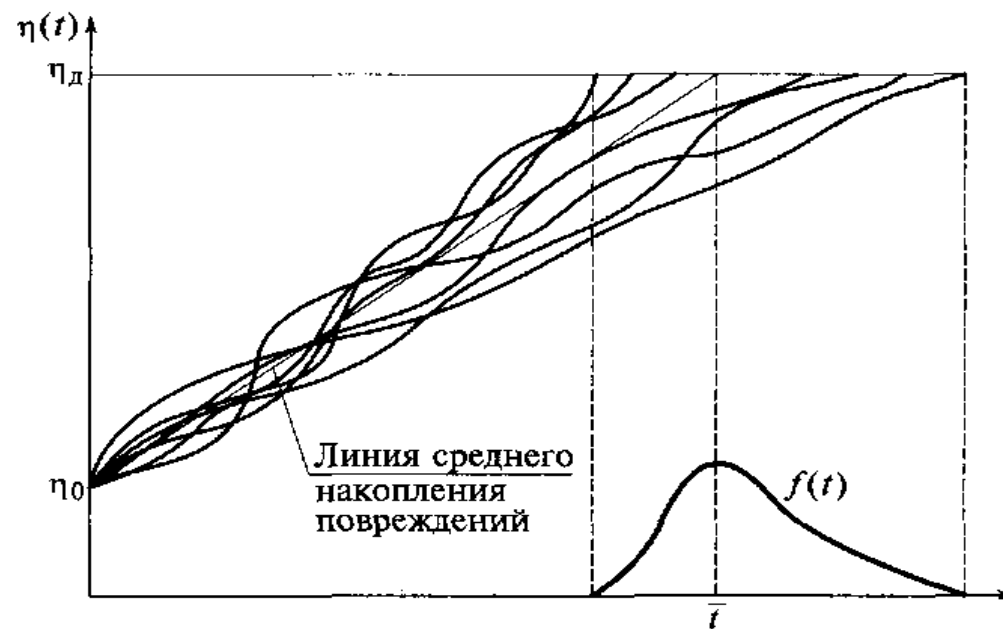
Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение определяются в соответствии с формулами

$$m = \sqrt{e^{2\mu + s^2}} \quad \sigma = \sqrt{e^{2\mu + s^2} (e^{s^2} - 1)}$$

Плотность логарифмически-нормального распределения описывается формулой

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - a)^2}{2\sigma^2}}, t \geq 0$$

где  $a$  – параметр распределения



### ***Распределение Вейбулла***

***Распределение Вейбулла*** является достаточно универсальным, благодаря возможности варьирования двух его параметров. Оно характеризуется плотностью распределения вероятностей:

$$f(t) = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha},$$

где  $\alpha$  — параметр формы;  $\beta$  — параметр масштаба.

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение выражаются через параметры  $\alpha$  и  $\beta$  следующим образом:

$$m = \beta \Gamma(1 + 1 / \alpha) \quad \sigma = \beta \sqrt{\Gamma(1 + 2 / \alpha) - \Gamma^2(1 + 1 / \alpha)}$$

где  $\Gamma$  — гамма-функция,

$$\Gamma(t) = \int_0^{+\infty} x^{t-1} e^{-x} dx$$

Универсальность распределения Вейбулла объясняется следующим: при  $\alpha = 1$  распределение превращается в экспоненциальное; при  $\alpha < 1$  функции плотности и интенсивности отказов убывающие; при  $\alpha > 1$  интенсивность отказов возрастающая; при  $\alpha = 2$  функция  $\lambda(t)$  линейная и распределение Вейбулла превращается в распределение Рэлея с плотностью

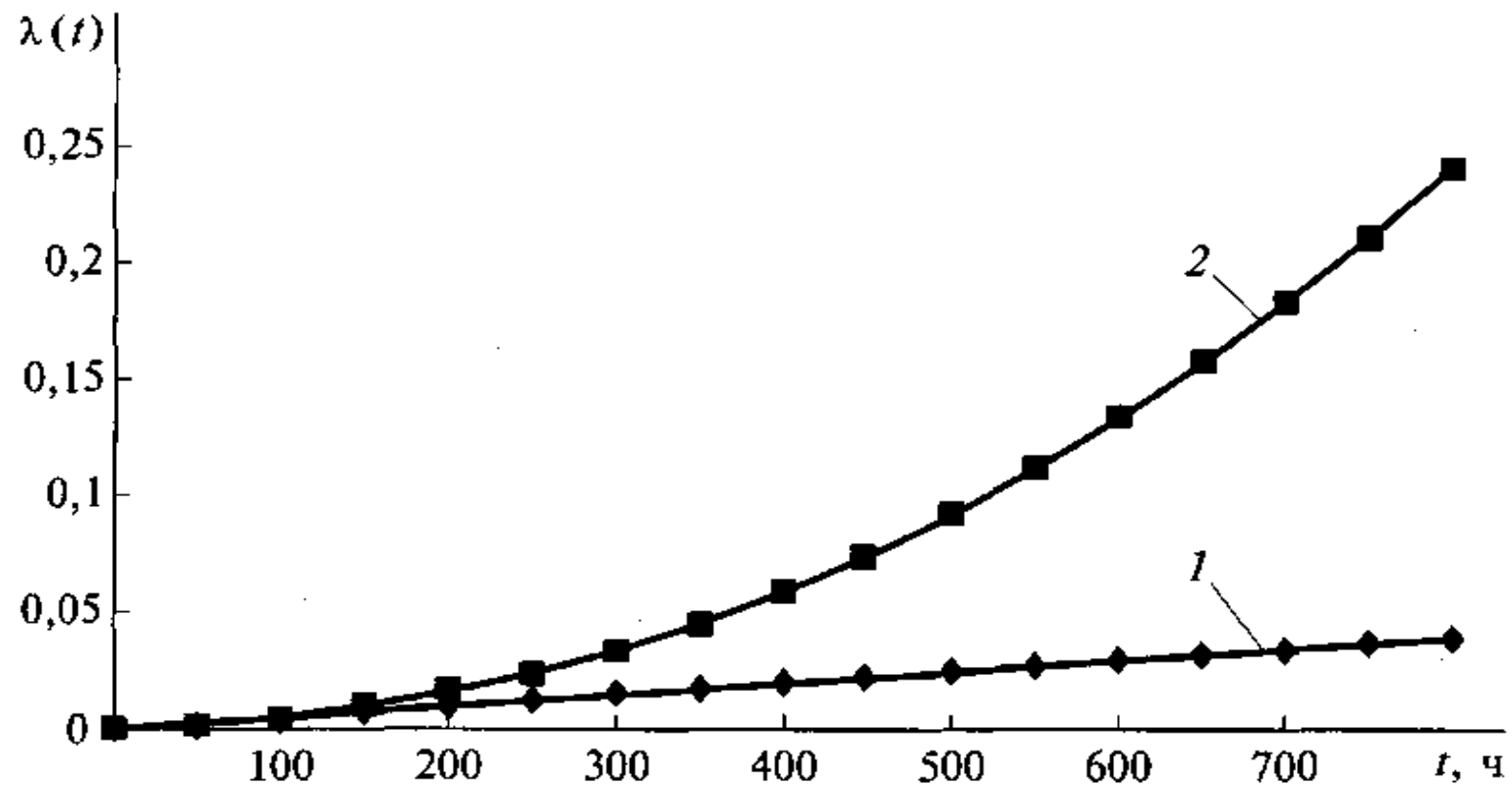
$$f(t) = 2\lambda t e^{-\lambda t^2}$$

при  $\alpha = 3,3$  распределение Вейбулла близко к нормальному.

Наряду с логарифмически-нормальным распределением, распределение Вейбулла хорошо описывает наработку деталей по усталостным разрушениям, наработку до отказа подшипников, а также позволяет оценивать надежность деталей и узлов машин, в частности автомобилей и др.

Зависимости между показателями надежности в случае распределения Вейбулла имеют вид

$$\lambda = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1} \quad P(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad T_1 = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$



Интенсивность отказов для распределения Вейбулла при разных параметрах:

1 — при  $m = 200$  ч и  $\sigma = 100$  ч; 2 — при  $m = 200$  ч и  $\sigma = 80$  ч

Таблица 3.1

**Типичные законы распределения наработок до отказов механизмов машин**

Закон распределения	Плотность распределения	Определяемые показатели
Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda t}$ $(\lambda — \text{параметр распределения})$	Наработка до отказа восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий, состоящих из большого числа элементов. Нарботка до отказа детали (узла), обусловленного внезапными повреждениями и поломками после периода приработки
Вейбулла	$ab t^{b-1} e^{-at^b}$ $(a, b — \text{параметры распределения})$	Наработка до отказа восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий при усталостном разрушении. Время восстановления изделий после отказа. Нарботка изделий в период приработки. Ресурс подшипников качения
Усеченный нормальный	$\frac{1}{\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}$ $(\sigma, a — \text{параметры распределения})$	Наработка изделий с постепенным изменением характеристик (коррозия, трение, усталость). Ресурс восстанавливаемых изделий до первого капитального ремонта
Логарифмически-нормальный	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} e^{-\frac{(\ln t - a)^2}{2\sigma^2}}$ $(a, \sigma — \text{параметры распределения})$	Наработка узлов (деталей) до отказа по причине усталостных износов. Периоды простоев по отысканию отказов

**Основные соотношения для показателей безотказности  
невосстанавливаемых изделий при различных законах распределения  
наработки до отказа**

Показатель	Законы распределения			
	Экспонен- циаль- ный	Вейбулла	Усеченный нормальный	Логарифмически- нормальный
Плотность распреде- ления $f(t)$	$\lambda e^{-\lambda t}$	$abt^{b-1}e^{-at^b}$	$\frac{1}{\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right)\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - a}{\sigma}\right)^2}$
Вероят- ность без- отказной работы $P(t)$	$e^{-\lambda t}$	$e^{-at^b}$	$\frac{\Phi\left(\frac{a-t}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right)}$	$\Phi\left(\frac{a - \ln t}{\sigma}\right)$
Интенсив- ность от- казов $\lambda(t)$	$\lambda$	$abt^{b-1}$	$\frac{e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}\Phi\left(\frac{a-t}{\sigma}\right)}$	$\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - a}{\sigma}\right)^2}}{\Phi\left(\frac{a - \ln t}{\sigma}\right)}$
Средняя наработка до перво- го отказа $T_1$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{\Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right)}{a^{\frac{1}{b}}}$	$a + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right)}e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}}$	$e^{a + \frac{b^2}{2}}$

## 2. Доверительный интервал и доверительная вероятность

Оценка неизвестного параметра  $a$  одним числом, как это было сказано ранее, называется «точечной». В ряде случаев требуется не только найти для параметра  $a$  подходящее численное значение, но и оценить его точность и надежность. Требуется знать, к каким ошибкам может привести замена параметра  $a$  его точечной оценкой и с какой степенью уверенности можно ожидать, что эти ошибки не выйдут за известные пределы. Такого рода задачи особенно актуальны при малом числе наблюдений, когда точечная оценка  $a$  в значительной мере случайна и приближенная замена  $a$  на  $a$  может привести к серьезным ошибкам. Для оценки точности и надежности параметра  $a$  используют так называемый **доверительный интервал и доверительную вероятность**.

# Лекция № 7

Тема: **СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

## ***Обработка информации об отказах машин***

Основная информация об отказах машин должна содержать, как минимум, две величины:

- 1) наименование отказавшего элемента;
- 2) величина наработки, при которой произошел отказ.

Дополнительная информация типа: марка машины, её возраст, характеристика условий эксплуатации и т.д. предназначена для предварительной обработки информации, а именно разделения ее на группы и подгруппы в зависимости от поставленных целей.

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ОСНОВНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОТКАЗАХ.

### *1) Предварительная обработка информации.*

В задачи предварительной обработки входит систематизация отказов, исключение заведомо грубых погрешностей и неточностей, сортировка данных по возрастанию значений и получения вариационного ряда.

### *2) Разбивка значений наработки на интервалы.*

Обычно для определения ориентировочного числа интервалов ( $K$ ) используется зависимость:  $K=1+3,2 \cdot \ln(n)$  или  $K \leq 5 \ln(n)$ , где  $n$  – объём выборки.

При определении количества интервалов рекомендуется ориентироваться на то, чтобы величина интервала  $\Delta x$  была удобной для расчёта, т.е. круглой цифрой.

В большинстве литературных источников рекомендуется выбирать следующее число интервалов:

при  $n \geq 100 - k \geq 15$ ;

при  $50 \leq n \leq 100 - 11 \leq k \leq 15$ ;

при  $n \leq 50 - k \geq 5$ .

**3) Определение числа отказавших элементов в интервалах,** среднего значения выборки, среднего квадратического отклонения, коэффициента вариации.

а) **Среднее арифметическое значение.** Среднее значение определяет такой показатель, как средняя наработка машины или его элемента до отказа, который определяется по формуле:

$$\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n},$$

где  $l_i$  - наработка  $i$ -ой машины до отказа;  
 $n$  - число машин, взятых под наблюдение;  
 $\bar{l}$  - средняя наработка машины до отказа.

б) **Размах.** Понятие размаха в теории статистики используется в качестве меры рассеивания случайной величины.

$$R_M = \ell_{max} - \ell_{min} ,$$

где  $\ell_{max}$  - максимальное значение наработки при отказе;

$\ell_{min}$  - минимальное значение наработки при отказе;

$R_M$  – размах.

в) **Среднее квадратическое отклонение** является также мерой рассеивания случайной величины. Среднее квадратическое отклонение наработки до отказа определяется:

$$\sigma(l) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2 / (n - 1)}$$

В некоторых расчётах используется понятие дисперсии:

$$D(e) = \sigma^2.$$

г) **Коэффициент вариации** также характеризует рассеивание случайной величины с учетом средней величины наработки. Коэффициент вариации определяется по формуле:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{L}} .$$

Различают случайные величины с малой вариацией ( $V \leq 0.1$ ), средней вариацией ( $0.1 < V \leq 0.33$ ) и большой вариацией ( $V > 0.33$ ).

**4) Определение для каждого интервала значений соответствующих показателей: статистической плотности распределения, статистической вероятности отказа.**

**Плотность вероятности отказа** - вероятность отказа за малую единицу наработки при работе элемента (машины) без замены:

$$f(l) = \frac{1}{n} \cdot \frac{dm}{dl} = P'(l) ,$$

где  $dm/dl$  - элементная вероятность, с которой в любой момент времени могут произойти отказы при работе машины без замены;  $P'(l)$  - производная от  $P(l)$ .

Применительно к отказам машин, где имеет место восстанавливаемые и невосстанавливаемые изделия, вводятся дополнительные показатели:

- *интенсивность отказов* (для невосстанавливаемых изделий);
- *параметр потока отказов* (для восстанавливаемых изделий).

*Интенсивность* (опасность) отказов – это вероятность отказов неремонтируемого изделия в единицу времени или наработки после определенного момента времени или наработки, при условии, что до этого момента отказ не возник. Интенсивность отказов определяется числом отказов в единицу времени, отнесенных к среднему числу элементов, исправно работающих в данный отрезок времени:

$$\lambda(l) = \frac{m(\Delta l_i)}{N(l) \cdot \Delta l_i} = \frac{f(l)}{R(l)},$$

где  $m(\Delta l_i)$  - число отказов в течение интервала  $\Delta l_i$ ;

$N(l)$  - число изделий работоспособных к моменту  $l$ .

*Примечание:* плотность вероятности отказов отличается от интенсивности отказов тем, что плотность подсчитывается с учётом выбывания отказавших элементов из расчёта, а интенсивность не зависит от количества ранее отказавших элементов.

Параметр потока отказов - это плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого изделия, определяемая для данного момента времени или пробега:

$$\omega(l) = \frac{m'(\Delta l_i)}{N \cdot \Delta l_i},$$

где  $N$  - число восстанавливаемых объектов, находящихся под наблюдением;

$m'(\Delta l_i)$  - суммарное число отказов в интервале  $\Delta l_i$  (в общем случае  $m'(\Delta l_i) \neq m(\Delta l_i)$ , т.к. восстанавливаемые объекты могут отказать несколько раз без их замены).

**Статистическая вероятность** появления отказа представляет собой отношение числа случаев отказов к общему числу случаев:

$$P^c(l) = \frac{m(l)}{n},$$

где  $m(\ell)$  - число отказавших элементов (машин) к моменту наработки  $\ell$ .

Событие, противоположное вероятности отказа, носит название **статистическая вероятность безотказной работы**:

$$R_c(l) = \frac{(n - m(l))}{n} = 1 - \frac{m(l)}{n}.$$

### **5) Построение статистических функций распределения и гистограммы.**

Наиболее исчерпывающей характеристикой надежности изделия является функция распределения вероятности безотказной работы или функция распределения вероятности отказа. Эти функции часто называют эмпирическими (статическими). По результатам испытаний рассматривают последовательность независимых наблюдений (например, отказов изделия). Если последовательность результатов наблюдений (например, наработок на отказ изделия) расположить в порядке возрастания  $l_1 < l_2, \dots < l_n$ , то будет получен так называемый вариационный ряд длительности жизни изделия.

Построение статистической функции распределения выполняют путем суммирования отношения

последовательно от одного участка к другому.

$$\sum_{k=1}^m \frac{k}{n}$$

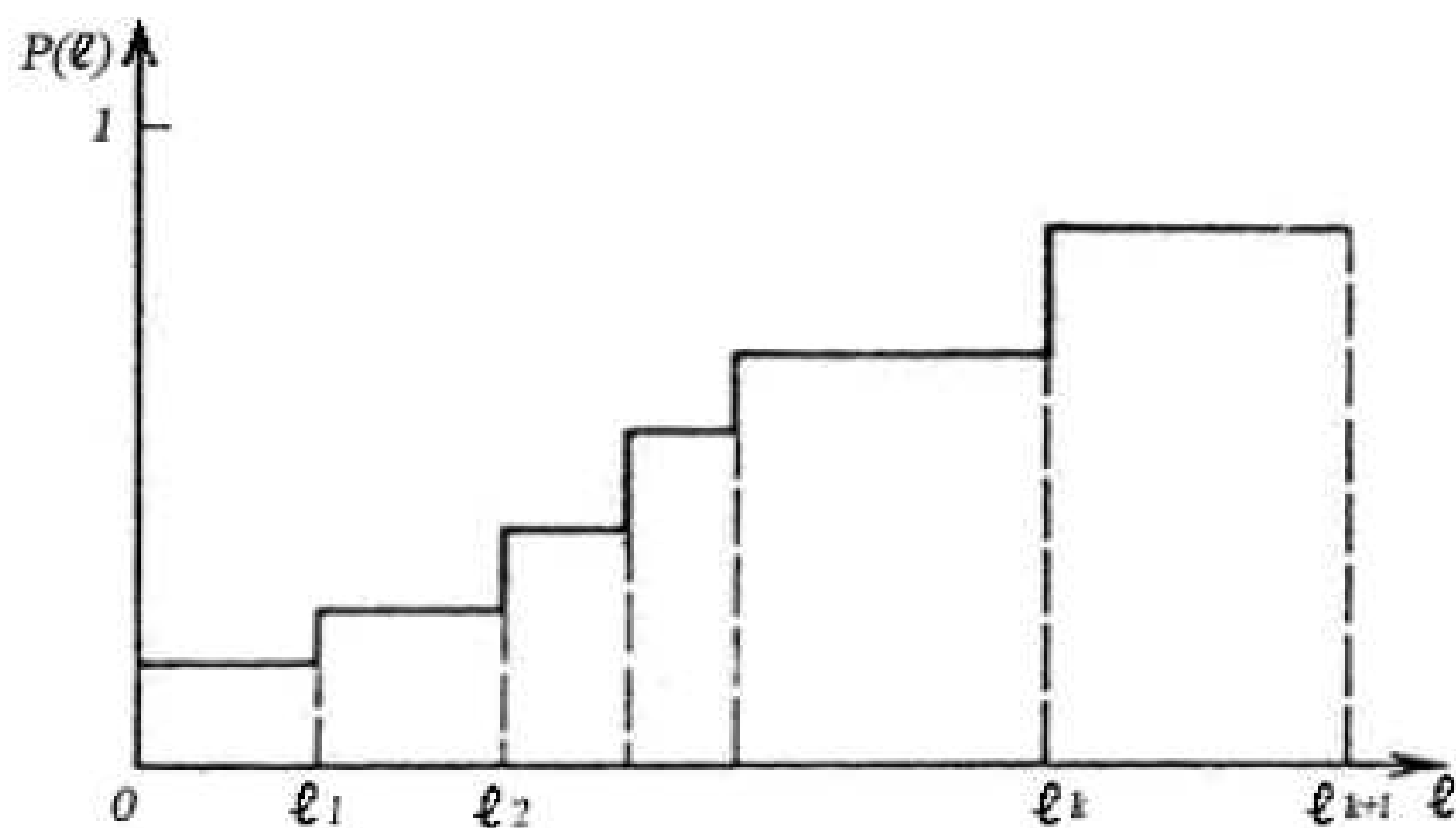


Рисунок 3.7. – Статистическая функция распределения отказов

Оценку плотности вероятности отказов лучше всего производить, используя *гистограмму*.

Гистограмма строится следующим образом: после разбивки наработки на интервалы в каждом из этих интервалов определяется статистическая плотность (количество отказов в интервале) и её значения наносятся на график. Графическое изображение плотности вероятности отказов для нормального закона представлено на рис. 3.8.

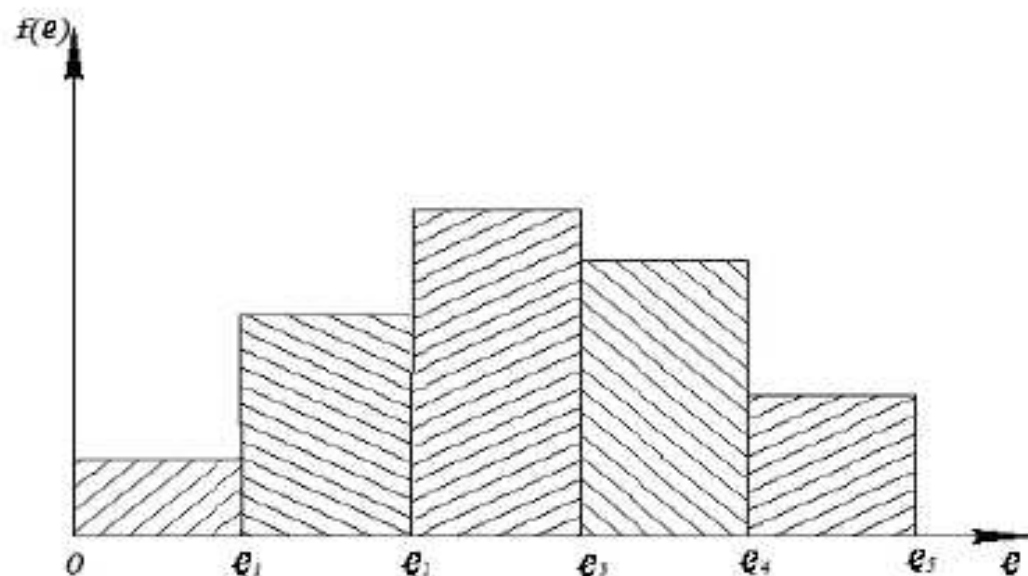


Рисунок 3.8 - Гистограмма для нормального распределения

## **6) Подбор внешнего вида теоретического распределения**

может осуществляться несколькими методами, но во всех случаях первоначально выдвигается так называемая нулевая гипотеза. *Нулевая гипотеза* – это соответствие экспериментального распределения случайных величин, одному из теоретических законов распределения.

**1-й метод.** Нулевую гипотезу можно принять на основе внешнего вида гистограммы. По внешнему виду гистограммы можно судить о законе распределения отказов. Для того чтобы эта оценка была более точна, необходимо, чтобы при построении гистограмм число интервалов было не менее пяти ( $k \geq 5$ ) (лучше 8 – 12), а число реализаций (отказов), попадающих в ближайшие интервалы от среднего значения – не менее десяти ( $mk \geq 10$ ). В этом случае, по внешнему виду гистограммы можно с достаточной точностью установить вид теоретического закона распределения.

**2-й метод.** Нулевую гипотезу, в первом приближении, можно принять на основании коэффициента вариации статистического распределения, параметры которого указывают на один из теоретических законов распределения. Известно что:

- при  $V \approx 0,1 \div 0,33$  - случайные события (отказы) могут быть описаны нормальным законом распределения;
- при  $V \approx 0,33 \div 0,5$  – логарифмически – нормальным распределением;
- при  $V \approx 0,65 \div 1,0$  – экспоненциальным распределением.

### **7). Расчёт параметров теоретического распределения.**

Расчёт производится по формулам выбранного в качестве нулевой гипотезы теоретического закона распределения

### **8). Проверка правильности выбора закона распределения.**

Для проверки соответствия статистического (экспериментального) распределения отказов выбранному теоретическому закону распределения существует несколько методик. Наиболее распространенной является методика проверки с использованием критерия согласия Пирсона ( $\chi^2$ ):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - m_{im})^2}{m_{im}},$$

где  $m_i$  – статистическая частота отказов;

$m_{im}$  – теоретическая частота отказов.

Для проверки правильности выбора нулевой гипотезы необходимо сравнить расчётную величину критерия Пирсона с табличной, приведённой в специальных таблицах для расчёта показателей надёжности.

$$\chi^2_{\text{рас.}} < \chi^2_{\text{табл.}}$$

Если условие выполняется, то нулевая гипотеза принимается. В противном случае необходимо уточнить нулевую гипотезу, т.е. принять гипотезу о распределении случайной величины по другому закону и повторить процедуру её проверки.

## **9). *Оценка параметров распределения.***

Статистические параметры распределения такие как: среднее значение, среднеквадратические отклонения и коэффициент вариации, рассчитанные на основе данных эксперимента, определены не совсем точно и требуют оценки. Точность их определения может быть оценена с помощью точечных и интервальных оценок.

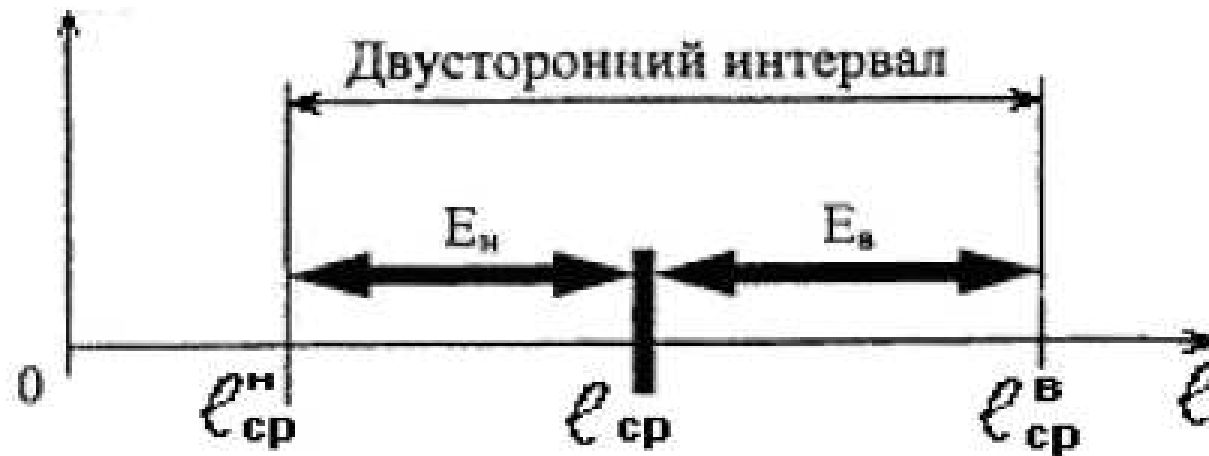
*Точечная оценка* выражается одним числом, т. е. характеризует одно из возможных значений случайной величины, обычно наиболее вероятное (определяется как среднее арифметическое).

Интервальная оценка – это область значений, где с определённой вероятностью может оказаться значение показателя надёжности. Если оценивается случайная величина, например:  $L$  и её граничные оценки равны  $L_H$  и  $L_B$ , то вероятность того, что случайная величина  $L$  примет значения между  $L_H$  и  $L_B$  или равна

им

$(P(L_H \leq L \leq L_B) = \alpha)$ , называется двусторонней доверительной вероятностью, а область  $L_H \leq L \leq L_B$

двусторонним доверительным интервалом (см. рис. 3.10)



Интервальная оценка выражается двумя числами, определяющими нижнюю и верхнюю границы интервала значений, в пределах которых с заданной вероятностью ожидается появление случайной величины.

Для расчета границ интервальной оценки необходимо задать двустороннюю доверительную вероятность  $\alpha$ :

$$\alpha = P ( L_{CPH} \leq L_{CP} \leq L_{CPE} ) .$$

По заданному значению  $\alpha$  определяют доверительный интервал  $E$ .

Для нормального закона распределения случайных величин доверительный интервал  $E$ , в первом приближении, определяется по формуле:

$$E = \frac{U_p \cdot \sigma}{\sqrt{N}},$$

где  $U_p$  – квантиль нормального распределения при заданной доверительной вероятности;

$N$  – число объектов наблюдений, или  $E = t_\gamma \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$

где  $t_\gamma$  – коэффициент Стьюдента (определяется по специальным таблицам в зависимости от  $N$  и от заданной надёжности ( $\gamma$ ))

### ***Построение кривых теоретического распределения.***

Зная закон распределения отказов и его параметры, строятся графики теоретического распределения

# Лекция №8

Тема: «Сложные системы и их свойства»

Под *системой* подразумевается множество элементов, находящихся в отношениях и связи между собой, которое образует определенную целостность, единство.

Важнейшим признаком системы является то, что составляющие ее элементы образуют во взаимосвязи единое целое с качественно новыми свойствами.

Различают три вида связей между элементами системы: **механическую** (когда связь между элементами осуществляется путем обмена усилиями), **трофическую** (обмен энергией) и **сигнальную** (обмен сигналами, информацией).

Встречающиеся в практике системы весьма разнообразны, поэтому для создания общих принципов и методов исследования необходимо производить их классификацию по некоторым наиболее существенным признакам. Такими признаками являются:

- *целевое назначение,*
- *целостность,*
- *сложность,*
- *степень неопределенности,*
- *характер поведения,*
- *степень адаптивности,*
- *уровень организации,*
- *управляемость,*
- *характер развития,*
- *область приложения и другие признаки.*

По сложности системы делятся на *простые, сложные и большие.*

*Простой системой* принято называть систему, которая не имеет разветвленной структуры (нельзя выделить иерархические уровни) и имеет небольшое число элементов.

***Сложной системой*** принято называть систему с разветвленной структурой и значительным количеством взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, являющихся простыми системами.

***Большой системой*** принято называть целостную человеко-машинную систему с централизованным автоматизированным управлением, целенаправленно функционирующую и совершенствующуюся в условиях случайных и конфликтных ситуаций.

Все многообразие систем, обслуживающих современное общество можно разделить на два основных типа:

- системы типа «человек - машина»,
- системы типа «человек - человек».

# Основные свойства систем

- *Целостность*, выражается представлением о целенаправленности и единстве. Она обеспечивает выполнение всеми компонентами системы целенаправленной работы как единого целого для выполнения ее назначения в процессе взаимодействия с внешней средой.

- *Эмерджентность* определяет наличие у системы таких свойств, которые не присущи её отдельным элементам; эмерджентность, характеризует неаддитивность свойств системы, нелинейность связи между свойствами системы и составляющих её элементов.

- *Иерархичность* (подчинённость) определяется наличием трех категорий систем:
  - социальных,
  - организационных,
  - технических.

Первые находятся на высшем, вторые - на низшем уровне системной иерархии. В техническом плане иерархический характер структуры свидетельствует о том, что любая система может быть представлена как часть системы более высокого уровня иерархии.

Способом регулирования многоуровневой иерархии является управление. Управление делает необходимым постановку проблемы цели и целесообразного поведения.

- *Конечность* системы определяется наличием у неё границ. Граница есть то, что отделяет систему от других объектов. Это понятие многогранно. Оно относится не только к пространственным аспектам системы, но также и к временным, количественным и др. Конечность системы указывает на конечность потребных для её создания и функционирования ресурсов и, следовательно, на принципиальную реализуемость системы.

- *Сложность системы* определяется большим числом возможных состояний.

Под *состоянием* системы понимается интегральная характеристика, определяющая зависимость выхода системы от её входа.

- *Стоимость* системы в известной мере характеризует её важность и сложность и определяет величину затрат (денежный эквивалент ресурсов), потребных для обеспечения её создания, производства и эксплуатации.

- *Автоматизированность* системы вытекает из её человеко-машинного характера, определяет сочетание в ней элементов принятия автоматических решений в тривиальных ситуациях с принятием решений человеком в тех случаях, когда обстановка нетривиальна и требует творческих решений.

- *Риск и неопределенность* характеризующие обстановку создания и использования системы связаны с неполнотой априорной информации о среде, системе и характере их взаимодействия.

## 2.Методы расчета сложных систем

Последовательность расчета надежности сложной системы сводится к следующему:

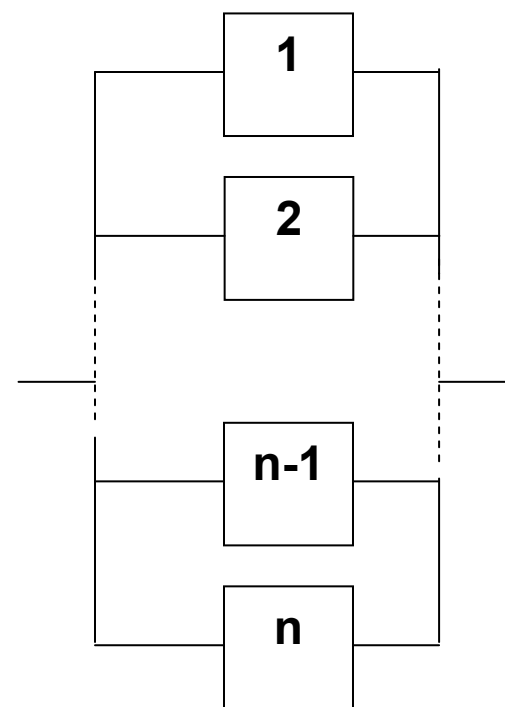
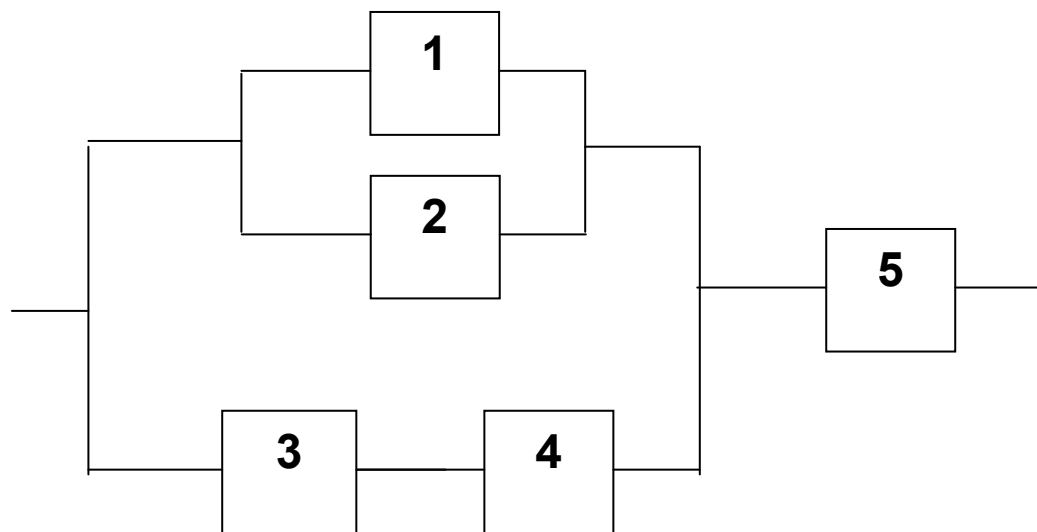
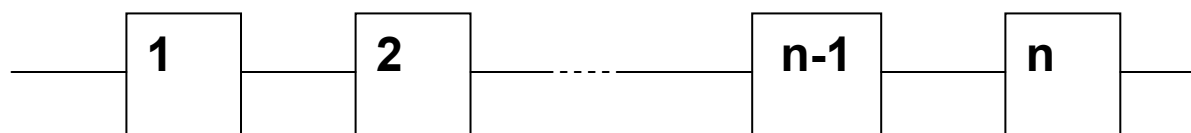
1. Формулируется задание на расчет надежности, в нем должны быть указаны:
  - назначение агрегата (системы), состав и основные сведения о функционировании;
  - рассчитываемые показатели надежности и признаки отказа;
  - условия, в которых работает (или будет работать) данный агрегат (система);
  - требования к точности и достоверности расчетов, к полноте учета воздействующих эксплуатационных факторов.
2. Производится выбор и обоснование показателей надежности, по которым будет производиться оценка надежности элемента или системы в целом;
3. Разрабатывается или составляется структурная схема надежности (ССН);

Последовательность расчета надежности сложной системы сводится к следующему:

4. Выбирается более рациональный метод расчета в соответствии с ССН;
5. Производится расчет и оценка точности полученных результатов;
6. Производится анализ полученных результатов и принятие решения.

Под **структурной схемой надежности** понимается наглядное представление (графическое или в виде логических уравнений) условий при которых работает или не работает исследуемый объект.

## Структурные схемы надежности элементов



Системой **без резервирования** называют такую систему, совокупность элементов которой позволяет выполнять заданные функции только при условии, что все элементы работоспособны.

Схемой такой системы, изображаемой графически, является последовательное (основное) включение элементов.

**Резервированной** системой называют такую совокупность элементов, а которой часть элементов является избыточной по отношению к минимальной функциональной структуре системы необходимой и достаточной для выполнения ею заданных функций.

Схемой такой системы, изображаемой графически, является параллельное включение элементов.

## ***Последовательное соединение элементов.***

$$p(X_1 \wedge X_2 \wedge \dots X_n) = p(X_1)p(X_2)\dots p(X_n) = \prod_{i=1}^n p(X_i)$$

$$P_c(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t)$$

;

.

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t))$$

$$\Lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

$$T_{OC} = 1 / \Lambda_c$$

$$T_{BC} = \Lambda_c^{-1} \sum_{i=1}^n \lambda_i t_{Bi}$$

## ***Параллельное соединение элементов***

$$p(\bar{X}_1 \wedge \bar{X}_2 \wedge \dots \bar{X}_n) = p(\bar{X}_1)p(\bar{X}_2)\dots p(\bar{X}_n) = \prod_{j=1}^m p(\bar{X}_i)$$

;

$$Q_c(t) = q_1(t)q_2(t)\dots q_n(t) = \prod_{j=1}^m q_i(t)$$

.

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_i(t))$$

$$\Lambda_c = (\prod_{j=1}^m \lambda_i t_{\epsilon j}) (\sum_{j=1}^m \frac{1}{t_{\epsilon j}})$$

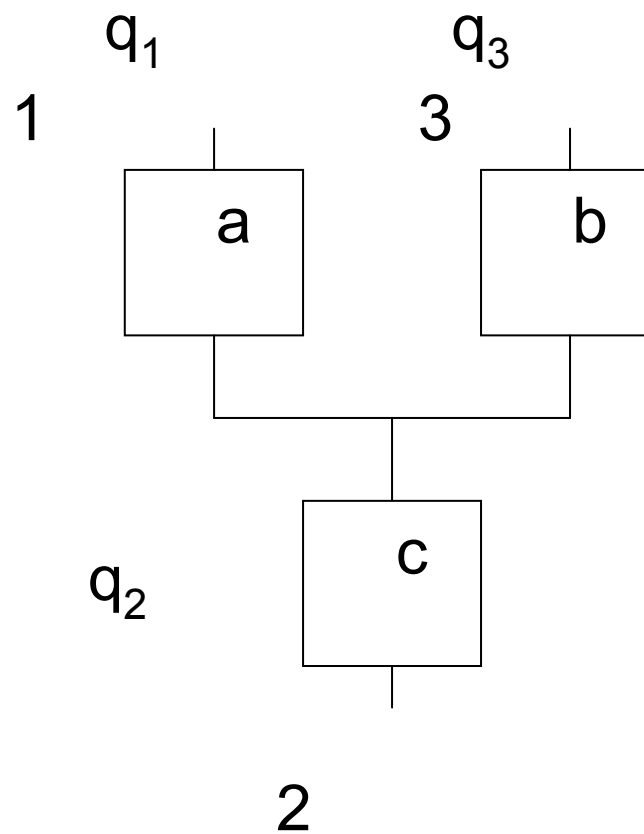
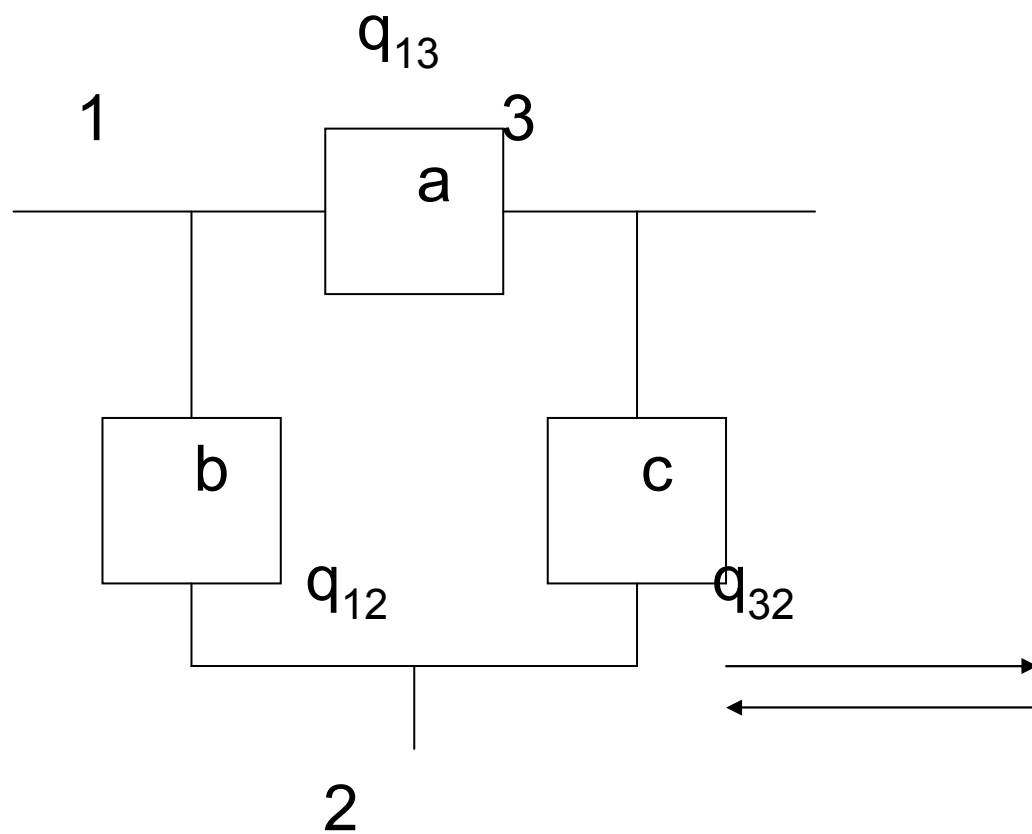
$$T_{BC} = 1 / (\sum_{j=1}^m \frac{1}{t_{\epsilon j}})$$

## **Способы преобразования сложных структур:**

- Способ эквивалентных замен;
- Разложение сложной структуры по базовому элементу;
- Матричный способ преобразования структуры.

## Способ эквивалентных замен

Сущность способа эквивалентных замен заключается в том, что в цепи структуры узел сложной конфигурации заменяется на узел другой, более простой конфигурации, но при этом подбирается такие характеристики нового узла, чтобы показатели надежности преобразуемой цепи структуры сохранялись прежними.



а – треугольника звездой

б- звезды треугольником

**Эквивалентные схемы замены соединений**

$$q_1 + q_2 - q_1 q_2 = q_{12}(q_{23} + q_{31} - q_{23} q_{31});$$

$$q_2 + q_3 - q_2 q_3 = q_{23}(q_{31} + q_{12} - q_{31} q_{12});$$

$$q_3 + q_1 - q_3 q_1 = q_{31}(q_{12} + q_{23} - q_{12} q_{23}).$$

Если пренебречь произведениями в результате решения системы уравнений можно записать

$$q_1 = q_{31} q_{12}; \quad q_2 = q_{23} q_{12}; \quad q_3 = q_{31} q_{23}.$$

Для обратного преобразования соединения элементов звездой в соединение элементов треугольником получаем следующие соотношения:

$$q_{12} = \sqrt{\frac{q_1 q_2}{q_3}} \quad q_{23} = \sqrt{\frac{q_2 q_3}{q_1}} \quad q_{31} = \sqrt{\frac{q_1 q_3}{q_2}}$$

# Разложение структуры по базовому элементу

В основе данного способа лежит использование теоремы о сумме вероятностей несовместных событий.

Для преобразования сложных структур в параллельно-последовательные выбирают базовый элемент (или группу базовых элементов) и делают следующие допущения;

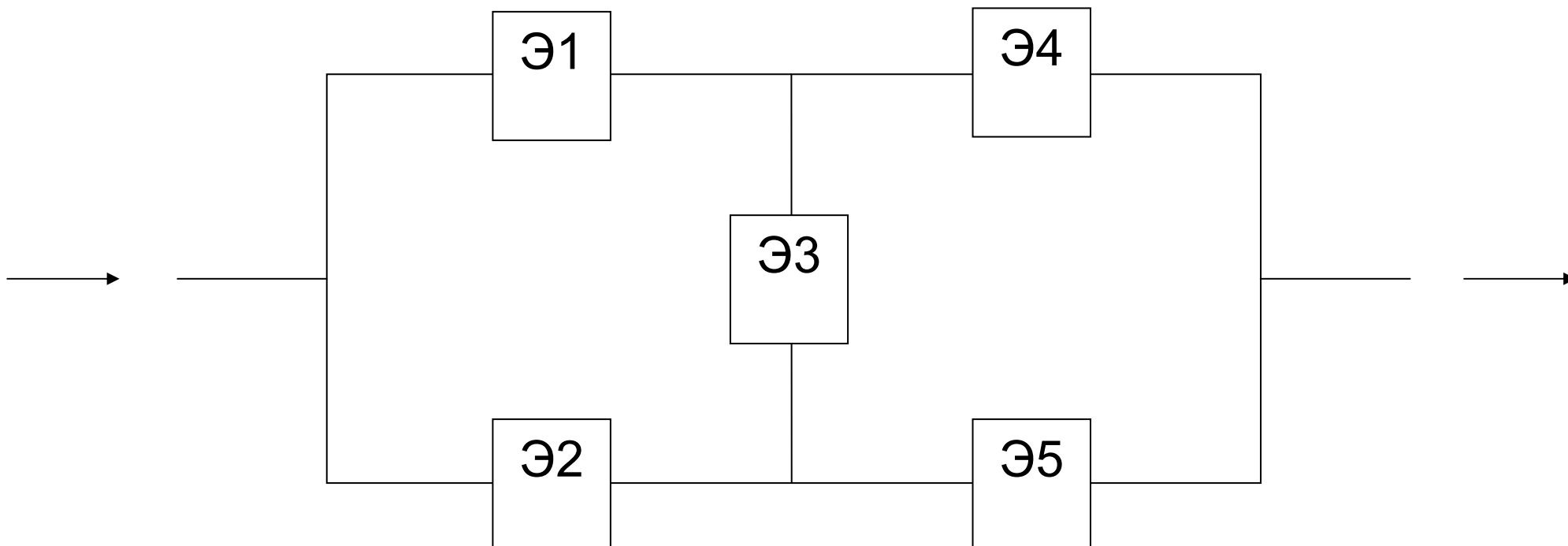
- 1) базовый элемент находится в работоспособном состоянии (поток жидкости, электрический ток, сигнал через него проходят)

- 2) базовый элемент находится в состоянии отказа (пропускная способность его равна нулю, электрический ток через него не проходит).

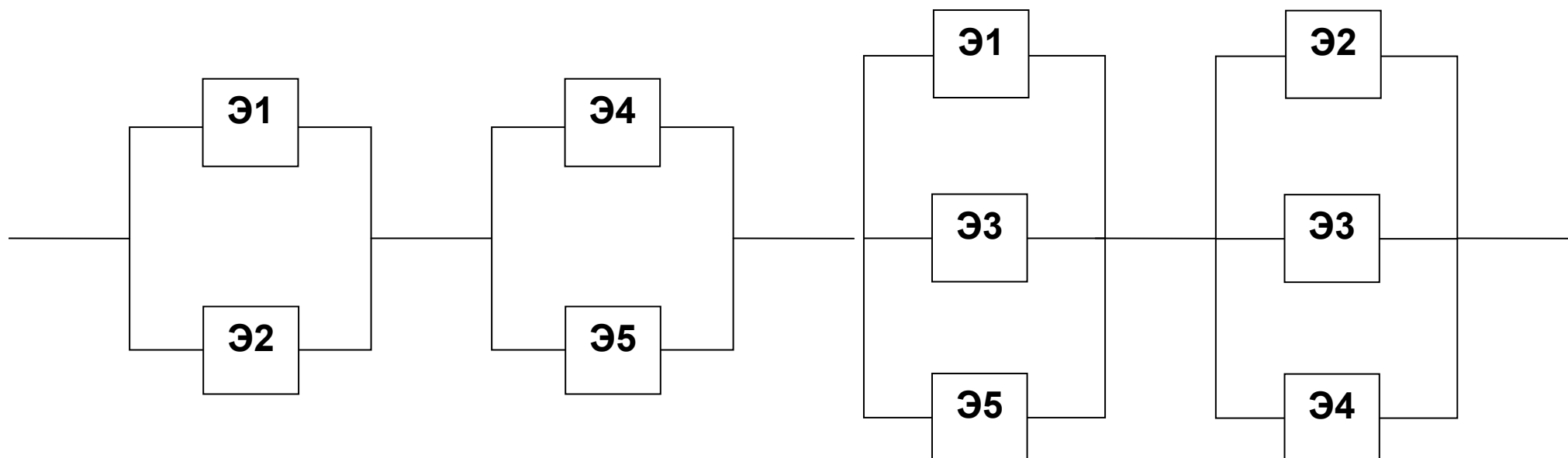
# Матричный способ преобразования структуры

В основе данного способа лежит составление матрицы состояний отказа рассматриваемой системы. Матрица составляется таким образом, чтобы число ее строк соответствовало числу возможных состояний отказа системы, а число столбцов - числу элементов в системе. В соответствии с сочетанием отказов элементов в системе, при которых наступает отказ системы, составляется структурная схема надежности.

## Логическая схема



## Структурная схема надежности



# **Лекция № 9**

**Тема: “Управление качеством и надежностью”**

## **Учебные вопросы:**

- 1. Качество как объект управления**
- 2. Порядок расчета показателей надежности изделий на этапе проектирования**

# *1.* Качество как объект управления

Под **управлением качеством продукции** следует понимать установление обеспечения и поддержание необходимого уровня качества продукции при ее разработке, производстве, эксплуатации или потреблении, осуществляемые путем систематического контроля качества и целенаправленного воздействия на условия и факторы, влияющие на качество продукции.

## Задачи управления качеством продукции

- планирование и прогнозирование качества продукции;
- выбор оптимального варианта при проектировании новых видов продукции;
- отработка нормативно-технических документов на новые виды продукции;
- постоянный контроль качества продукции;

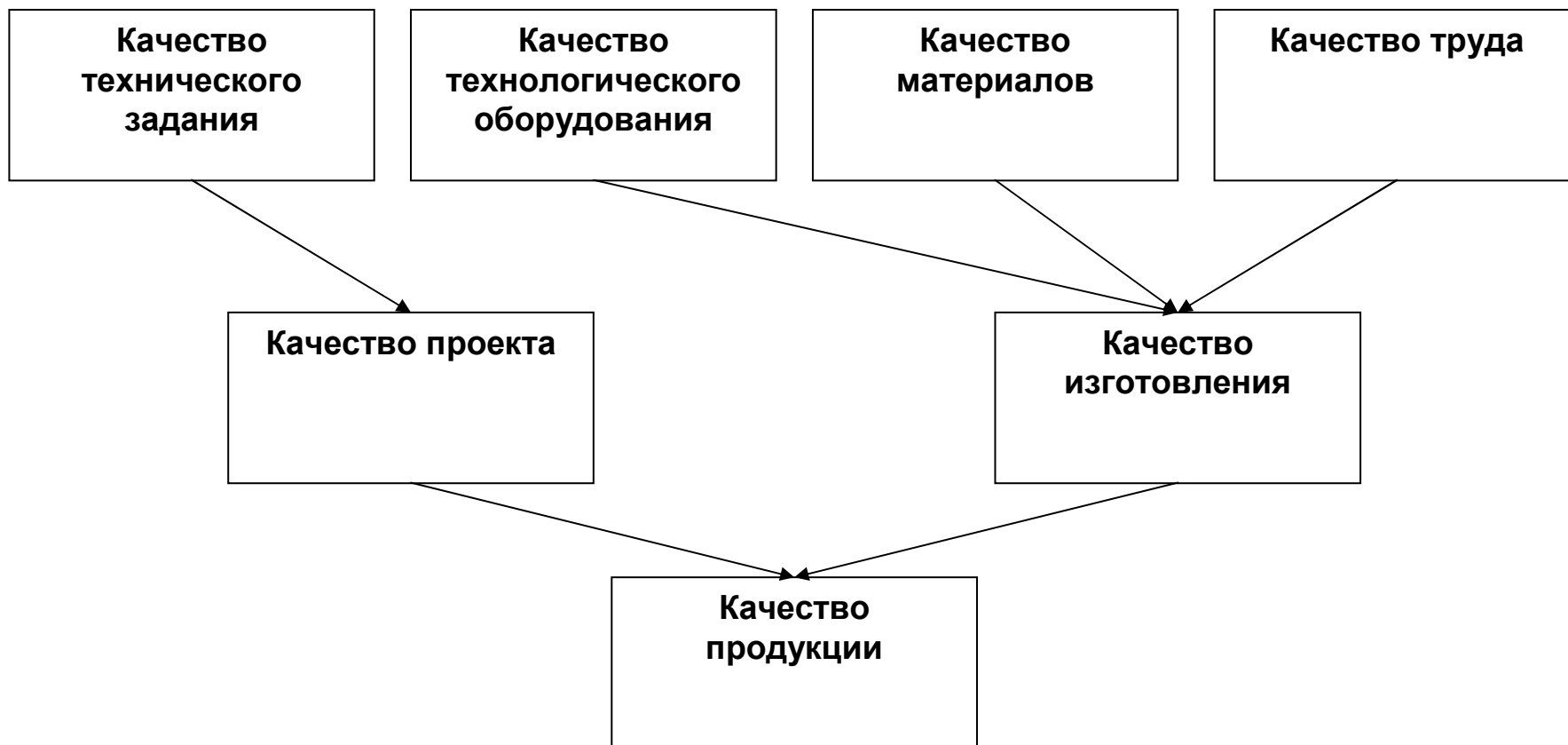
# Задачи управления качеством продукции

- моральное и материальное стимулирование исполнителей;
- поддержание и повышение качества продукции;
- аттестация качества продукции;

## Задачи управления качеством продукции

- анализ изменения качества продукции в процессе ее производства и эксплуатации;
- отработка научно обоснованных правил эксплуатации продукции и состава ЗИПа;
- введение и осуществление постоянной информации по качеству продукции.

## Составляющие качества продукции



## **2. Порядок расчета показателей надежности изделий на этапе проектирования**

Повышение надежности проектируемой техники достигается следующими мероприятиями:

- упрощением схемных решений;
- выбором наиболее надежных комплектующих элементов и других технических изделий;
- разработкой схем с ограниченными последствиями отказов изделий;

Повышение надежности проектируемой техники достигается следующими мероприятиями:

- снижением механических нагрузок, облегчением электрического, теплового и других режимов работы изделий;
- применением резервных элементов и подсистем, механизмов, блоков и др.;
- стандартизацией и унификацией комплектующих элементов и изделий в целом;
- применением элементов и объектов встроенного контроля;
- автоматизацией проверок и оценок технического состояния исследуемых объектов.

В техническом задании заказчика на разработку образцов техники задаются:

- 1) требуемая вероятность безотказной работы объекта при выполнении поставленной задачи  $P(t)$ ;
- 2) наработка на отказ  $t_o$ ;
- 3) требуемое значение коэффициента готовности  $K_r$ ;
- 4) средние квадратические отклонения:
  - вероятности безотказной работы  $\sigma(P_t)$ ;
  - наработки на отказ  $\sigma(T_o)$ ;
  - среднего времени восстановления работоспособного состояния  $\sigma(T_v)$ .

Предприятием-разработчиком определяются следующие исходные данные:

- 1) интенсивность отказов изделий  $\lambda_o$ ;
- 2) время работы элементов, составных частей в составе изделия при выполнении им поставленной задачи  $t$ ;
- 3) среднее время восстановления работоспособного состояния изделий  $T_v$ ;
- 4) средние квадратические отклонения:
  - интенсивности отказов изделий  $\sigma(\lambda_o)$ ;
  - среднего времени восстановления работоспособного состояния  $\sigma(T_v)$ ;
- 5) коэффициент эксплуатации  $K_z$ , учитывающий влияние механических перегрузок (вибраций, ударов, линейных ускорений и др.);
- 6) коэффициенты, учитывающие влияние температуры окружающей среды, электрические нагрузки, влияние влажности на негерметизированную влагонезащищенную аппаратуру и т.д.

- Распределение показателей надежности может производиться между агрегатами, системами и машинами комплекса, совместно выполняющими поставленную задачу, и между отдельными составными частями (сборочными единицами) агрегатов, машин.

$$P_{Mi} = P_{\Sigma}^{\frac{N}{N_{\Sigma}}}$$

Значения показателей надежности, заданные в ТЗ, могут быть распределены между составными частями машин, агрегатов следующими методами:

- *методом весовых коэффициентов;*
- *методом минимальных затрат на изготовление агрегата.*

## Метод весовых коэффициентов

Вероятность отказа  $i$ -й системы (сборочной единицы)  $q_i(t)$  есть функция, зависящая от интенсивности отказов  $\lambda_i$  и времени работы  $t_i$ , т.е.  $q_i(t)=f(\lambda_i, t_i)$ .

Так как суммарная интенсивность отказов системы является функцией числа элементов  $\lambda_i$ , то можно записать следующее выражение:  $q_i(t)=f(n_i, t_i)$ .

**Случай 1.** Распределение вероятности отказа производится пропорционально количеству элементов, которое содержит каждая система, т.е.:  $q_i(t)=f(n_i)$ .

Такое распределение осуществляется для систем, время работы которых в течение цикла незначительно отличается от продолжительности цикла  $t_{ц}$ , т.е.  $t_i \approx t_{ц}$ .

При значении вероятности отказа системы, определяемом по формуле

$$q_i(t) \approx \lambda_i t_i.$$

где  $\lambda_i$  - интенсивность отказов  $i$ -й системы, зависимость между вероятностью отказа  $q_i(t)$  и количеством элементов в системе  $n_i$  имеет линейный характер.

Значение весового коэффициента определяется по формуле

$$\alpha_i = n_i / n_{cp}$$

здесь  $n_i$  - число элементов  $i$ -й системы;  $n_{cp}$  - среднее число элементов в одной системе (сборочной единице);

$N$  - число сборочных единиц, составляющих агрегат (машину).

В этом случае вероятность отказа  $q_i(t)$   $i$ -й системы определяется по формуле:

$$q_i(t) = \alpha_i q_{cp}; \quad q_{cp} = 1 - P_{cp}(t);$$

**Случай 2.** Распределение вероятности отказа производится пропорционально времени работы системы в течение цикла, т.е.  $q_i(t)=f(t_i)$ .

Такое распределение осуществляется для систем, в которых число элементов примерно одинаково, т.е.  $n_i \approx n_{cp}$ .

**Случай 3.** Распределение показателей надежности осуществляется пропорционально количеству элементов и времени работы системы в течение цикла, т.е.

$$q_i(t)=f(n_i, t_i).$$

Такое распределений осуществляется только в тех случаях, когда заранее известно количество элементов в отдельных системах и время их работы в течение цикла.