

Белорусский государственный университет транспорта
кафедра «Локомотивы»

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Лектор: к.т.н., доцент Комиссаров Виктор Владимирович

Лекции – 2 часа (II семестр); 2 часа (III семестр).

Практические занятия – нет (II семестр); 6 часов (III семестр).

*Самостоятельное изучение тем –
нет (II семестр); 14 часов (III семестр).*

Форма контроля знаний – зачет

ГОМЕЛЬ, 2018



Основная:

1. **Шевченко, Д.Н.** Основы теории надежности : учеб.-методич. пособие для студ. техн. спец./ Д.Н. Шевченко; под ред. Л.А. Сосновского. – Гомель: БелГУТ, 2010. – 250 с. (в НТБ БелГУТа)
2. **Сосновский, Л.А.** Элементы теории вероятностей, математической статистики и теории надёжности / Л.А. Сосновский. – Гомель; БелГУТ, 1994. – 146 с. (в НТБ БелГУТа).
3. **Богданович, А.В.** Оценка основных показателей надежности и риска невосстанавливаемых изделий / А.В. Богданович, О.М. Еловой, Л.А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 1995 г. – 95 с. (в НТБ БелГУТа)
4. **Сосновский, Л. А.** L-риск (механотермодинамика необратимых повреждений) / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 317 с.

Дополнительная:

5. Оценка надежности машин и оборудования: теория и практика : учебник / И.Н. Кравченко, Е.А. Пучин, А.В. Чепурин [и др.] ; под ред. проф. И.Н. Кравченко. – М. : Альфа-М : ИНФРА-М, 2015. – 336 с.
6. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
7. Половко, А. М. Основы теории надежности : 2-е изд., перераб. и доп. / А.М. Половко, С.В. Гуров – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
8. Половко, А. М. Основы теории надежности : практикум / А.М. Половко, С.В. Гуров – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.



СТРУКТУРА СОДЕРЖАНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ



В соответствии с учебным планом на изучение дисциплины отведено всего 54 часа для специальностей 1-368004 (ЗМО), 1-368001 (ЗМТ) и 100 часов для специальности 1-458001 (ЗМСС).

В том числе **14 аудиторных часов**, из них лекции – **4 часа**, практические занятия – **6 часов**, СУРС – **4 часа**. Форма текущей аттестации – зачет. Трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

Распределение аудиторных часов и форм отчетности по заочному отделению.

Семестр	Всего часов / зачетных единиц	Часов аудиторных занятий по видам учебной работы				Самостоятель ное изучение тем, ч.	Форма отчетности
		Всего	Лекции	Лаборат орные занятия	Практич еские занятия		
2	20 / 0 (ЗМО, ЗМТ) 32 / 0 (ЗМСС)	2	2	–	–	–	–
3	34 / 2 (ЗМО, ЗМТ) 68 / 3 (ЗМСС)	12	2	–	6	4	14 зачет
Всего	54 / 2 (ЗМО, ЗМТ) 100 / 3 (ЗМСС)	14	3	–	6	4	14



Лекция 1. Надежность в технике. Отказы и их причины. Статистический анализ.

Основные понятия теории надежности. Значение проблемы надежности. Система основных понятий и определений теории надежности. Показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости. Проблемы надежности для железнодорожного и автомобильного транспорта.

Отказы функционирования и отказы параметрические. Классификация отказов по характеру проявления и развития, по последствиям, по возможности дальнейшего использования объекта, по времени возникновения, по причине возникновения. Основные виды повреждений, приводящие к неработоспособным или предельным состояниям. Классификация объектов по последствиям отказов. Статистический анализ.



Лекция 2. Оценка показателей надежности: модель отказов, модель нагрузка-прочность. Схемная надежность. Концепция риска.

Оценка безопасности.

Показатели надежности и их взаимосвязь. Типичные функции распределения, используемые в расчетах надежности и их параметры. Расчет вероятности безотказной работы и анализ интенсивности отказов. Модель нагрузка – прочность. Основы дифференциации расчетов на надежность.

Структурные модели надежности элементов сложных технических систем. Резервирование и его разновидности. Байесовский подход для расчета схемной надежности. Анализ надежности с помощью дерева отказов.

Развитие методов оценки риска и безопасности. Подходы к определению риска. Построение оперативной характеристики риска. Допустимый и предельный риски. Концепция: качество–риск–надежность.

Заключение: проблемы теории надёжности технических объектов.



Лекция 1

НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ И КРУПНЫЕ КАТАСТРОФЫ Объекты нефтегазохимии

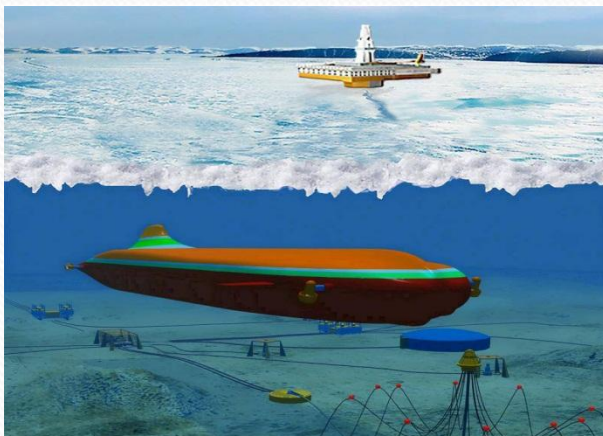
Современный нефтеперерабатывающий комплекс



Авария на Нижневартовском НПЗ



Технология добычи и транспортировки
сжиженного природного газа (СПГ) на АПЛ



Крушение нефтяной морской платформы
«Кольская» при ее транспортировке



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ И КРУПНЫЕ КАТАСТРОФЫ Объекты энергетики

Саяно-Шушенская ГЭС – Вторая жизнь



Катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС



Белоярская АЭС с энергоблоком БН-800



Катастрофа на Чернобыльской АЭС



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ И КРУПНЫЕ КАТАСТРОФЫ

Объекты транспортного комплекса

Скоростные железнодорожные поезда со скоростью до 350-400 км/час и более



Аварии на железнодорожном транспорте



Перспективный многоцелевой истребитель пятого поколения ПАК ФА (Т-50)



Катастрофа транспортного авиалайнера в Иркутске



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ И КРУПНЫЕ КАТАСТРОФЫ

Объекты космического комплекса

Многоразовая авиационно-космическая система МАКС с воздушным стартом



Крушение суборбитального аппарата SpaceShipTwo



Ракетно-космический комплекс "Ангара"



Авария при старте ракеты-носителя «Протон»

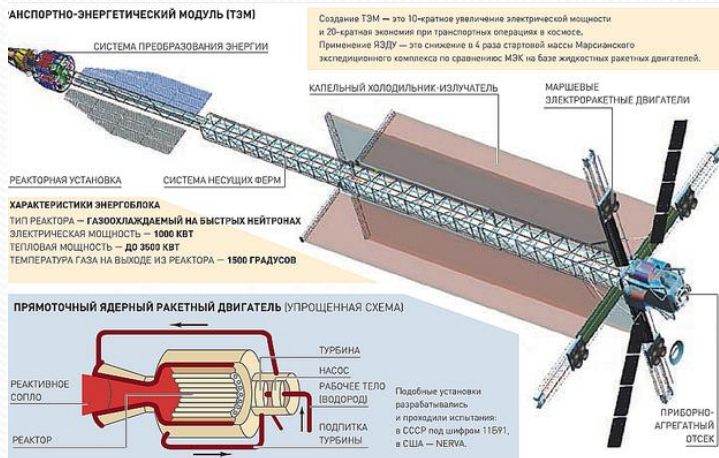


ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ И КРУПНЫЕ КАТАСТРОФЫ

Ядерные энергоустановки

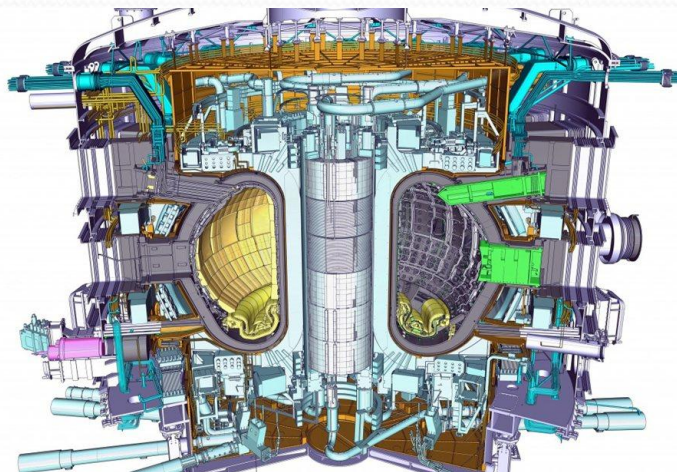
Ядерная энергоустановка мегаваттного класса

Авария при эксплуатации ЯЭУ "Топаз"



Перспективный международный термоядерный реактор ИТЭР

Отказы на импульсной термоядерной установке "Ангара-5"





Надежность – свойство объекта сохранять во времени и в

Примечание – Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования (термины в соответствии с ГОСТ 27.002-89)

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

Объектами могут быть различные системы и их элементы.

- уровень 1 – машина, оборудование (например, автомобиль);
- уровень 2 – агрегаты и системы (например, трансмиссия, несущая система);
- уровень 3 – узлы и подсистемы (например, коробка передач, ведущий мост);
- уровень 4 – детали (например, зубчатые колеса), типовые комплектующие изделия (например, подшипники качения), сопряжения (например, шлицевые соединения);
- уровень 5 – конструктивные элементы (например, зубья зубчатых колес);
- уровень 6 – простейшие компоненты (например, локальные области поверхностного слоя зубьев).



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ

Менеджмент надежности технически сложных изделий

НАДЗЕЙНАСЦЬ У ТЭХНІЦЫ

Менеджмент надзейнасці тэхнічна складаных вырабаў

1 РАЗРАБОТАН техническим комитетом по стандартизации ТК ВУ «Надежность в технике», государственным научным учреждением «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

4.3.1 Основными задачами менеджмента надежности ТСИ являются:

- обоснование необходимого уровня надежности с учетом требований рынка (ов) по реализации ТСИ и возможностей предприятия;
- обеспечение необходимого уровня надежности;
- подтверждение достигнутой надежности;
- выявление и использование возможностей повышения надежности ТСИ;
- мониторинг надежности на всех стадиях жизненного цикла ТСИ;
- выявление и предупреждение отказов и факторов, влияющих на надежность;
- накопление информации о надежности производимых ТСИ и их аналогов.

щего управления качеством, осуществляемых на предприятии в целях выполнения требований

Примечание – Типовой жизненный цикл включает разработку концепции, проведение научно-исследовательской работы (НИР) и опытно-конструкторской работы (ОКР); изготовление опытного образца, испытания, производство, ввод в эксплуатацию, эксплуатацию и техническое обслуживание; модернизацию, вывод из эксплуатации и утилизацию.



СТБ 2466-2016

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ

Расчет надежности технически сложных изделий

НАДЗЕЙНАСЦЬ У ТЭХНІЦЫ

Разлік надзейнасці тэхнічна складаных вырабаў

1 РАЗРАБОТАН техническим комитетом по стандартизации ТК ВУ «Надежность в технике», государственным научным учреждением «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает общие правила расчета надежности технически сложных изделий (ТСИ), требования к методикам расчета надежности и порядок представления результатов расчета.

ОБЩАЯ СТРУКТУРА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТЕХНОСФЕРЫ



ОБОБЩЕННАЯ ДИАГРАММА ОПАСНЫХ И ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

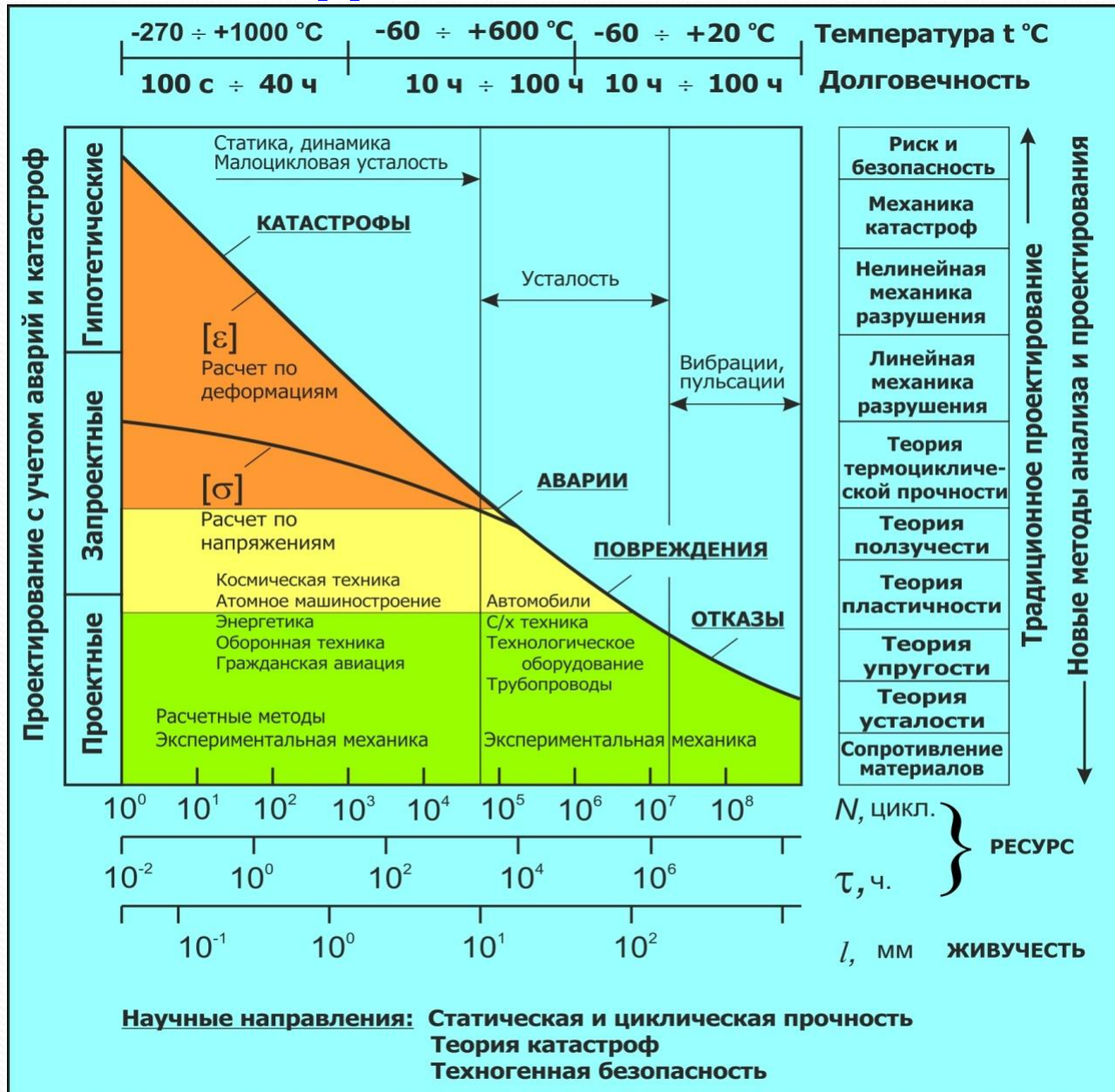




Таблица 1. СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

<i>Понятие</i>	<i>Определение</i>
Исправное состояние	Состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации
Неисправное состояние	Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации
Работоспособное состояние	Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации
Неработоспособное состояние	Состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации
Предельное состояние	Состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно
Критерий предельного состояния	Признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией



Таблица 2. СОБЫТИЯ



Понятие	Определение
Повреждение	Событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния
Отказ	Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта

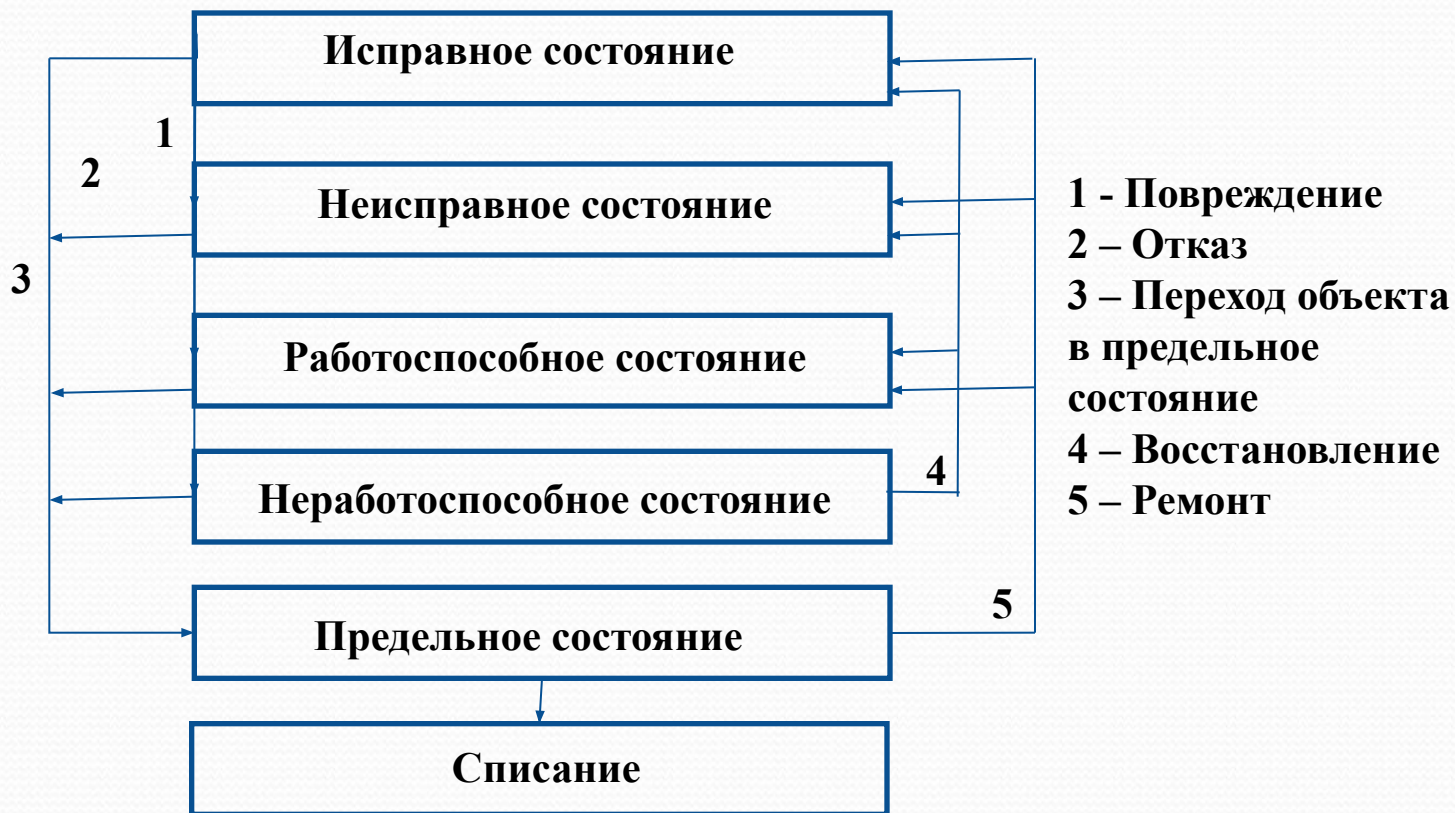


Схема основных состояний объекта и событий



Таблица 3. СВОЙСТВА ОБЪЕКТОВ

19

<i>Понятие</i>	<i>Определение</i>
Безотказность	Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность (т. е. не иметь отказов) в течение некоторого времени или некоторой наработки
Долговечность	Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания
Ремонтопригодность	Свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта
Сохраняемость	Свойство объекта сохранять значение показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования



Таблица 4. СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ



<i>Понятие</i>	<i>Определение</i>
<i>ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ</i>	
Наработка	Продолжительность или объем работы объекта
Наработка до отказа	Наработка объекта от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа
Технический ресурс	Наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние
Срок службы	Календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние



Таблица 4. СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ



Понятие	Определение
ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ	
Вероятность безотказной работы	Вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа объекта не возникает
Средняя наработка до отказа	Математическое ожидание наработки объекта до первого отказа
Гамма-процентная наработка до отказа	Наработка, в течение которой отказ объекта не возникает, с вероятностью γ , выраженной в процентах
Средняя наработка на отказ	Отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки
Интенсивность отказов	Условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до того момента отказ не возник
Параметр потока отказов	Показатель надежности восстанавливаемых изделий, равный отношению среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольную малую его наработку к значению этой наработки (соответствует интенсивности отказов для неремонтируемых изделий,



Таблица 4. СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ



Понятие	Определение
ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ	
Средний ресурс	Математическое ожидание ресурса
Гамма-процентный ресурс	Наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния, с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах
Назначенный ресурс	Суммарная наработка объекта, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено
Средний срок службы	Математическое ожидание срока службы
Гамма-процентный срок службы	Календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта, в течение которой он не достиг предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах
Назначенный срок службы	Календарная продолжительность эксплуатации объекта, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено



Таблица 4. СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ



<i>Понятие</i>	<i>Определение</i>
<i>ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ</i>	
Вероятность восстановления работоспособного состояния	Вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного
Среднее время Восстановления работоспособного состояния	Математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния



Таблица 4. СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ



Понятие	Определение
<i>ПОКАЗАТЕЛИ СОХРАНЯЕМОСТИ</i>	
Средний срок Сохраняемости	Математическое ожидание срока сохраняемости
Гамма-процентный срок сохраняемости	Срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах



Таблица 4. СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ



Понятие	Определение
КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ	
Коэффициент готовности	Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается
Коэффициент оперативной готовности	Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени
Коэффициент технического использования	Отношение математического ожидания интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, простоев, обусловленный техническим обслуживанием, и ремонтов за тот же период эксплуатации
Коэффициент планируемого применения	Доля периода эксплуатации, в течение которой объект не должен находиться в плановом техническом обслуживании и ремонте
Коэффициент сохранения эффективности	Отношение значения показателя эффективности за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленного при условии, что отказы объекта в течение того же периода эксплуатации не возникают



2 ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ



Таблица 1 - Классификация отказов

Признак классификации	Вид отказа	Примеры
по характеру развития и проявления	а) внезапные	поломки от перегрузки, заедания; сторание предохранителя; поломка рельса
	б) постепенные	износ, старение, коррозия, залипание
	в) постепенные по развитию и внезапные по появлению	усталостное разрушение, перегорание ламп, короткие замыкания из-за старения изоляции
по последствиям	а) легкие	легко устранимые
	б) средние	не вызывают отказ других узлов
	в) тяжелые	тяжелые вторичные разрушения, в том числе и с человеческими жертвами
по возможности дальнейшего использования	а) полный отказ	исключает возможность работы изделия до устранения отказа
	б) частичный	изделие может частично использоваться, например, с неполной мощностью, или на пониженных оборотах
по времени возникновения	а) приработочные	обусловленные, например, деформациями при изготовлении
	б) при нормальной (штатной) эксплуатации	обусловленные, например, накоплением повреждений



2 ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ



Таблица 1 - Классификация отказов

Признак классификации	Вид отказа	Примеры
по причине возникновения	а) конструкционные	обусловленные ошибками при конструировании
	б) производственные	условия изготовления, сварки, технического обслуживания
	в) эксплуатационные	обусловлены нарушением установленных правил эксплуатации и текущего содержания
по закономерностям возникновения	а) случайные	непредусмотренные перегрузки, дефекты материала и погрешности изготовления, не обнаруженные контролем; ошибки обслуживающего персонала или сбои системы управления
	б) систематические	закономерные явления, вызывающие постепенное накопление повреждений: влияние среды, времени, температуры, облучения, коррозия, старение, нагрузки и работа трения, усталость, ползучесть, износ, засорения, залипания, утечки



2 ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ



Таблица 2 - Основные причины отказов

Виды разрушений	Характерные признаки предельного состояния	Наименование деталей машин, подвергающихся данному разрушению
1. Статическое разрушение	Хрупкое разрушение, хрупкий излом	Сварные соединения, фасонные детали, болты, валики, пальцы, чугунные отливки
2. Малоцикловая усталость	Вязкий излом, достижение допустимой величины пластической деформации	Корпусные детали, зубчатые колеса, валы, оси, пружины, бандажи, рельсы, сосуды, подшипники скольжения
3. Многоцикловая усталость	Усталостная трещина, усталостный излом, критическая глубина или плотность ямок выкрашивания	Корпусные детали, зубчатые колеса, подшипники качения, валы, оси, пружины, шатуны, болты, сварные соединения, рельсы, бандажи колес
4. Ползучесть	Достижение допустимой величины пластической деформации	Детали энергетического оборудования, работающие в условиях повышенных температур
5. Износ	Достижение износом нормативной величины, нарушение условий смазки, схватывание	Резьбовые соединения, зубчатые колеса, подшипники скольжения, валы, оси, направляющие, кулисы, цепные и зубчатые передачи, поршневые кольца, втулки, лемехи, лапы культиваторов, гусеницы, пескометы, фрикционы, шпоночные соединения и другие детали машин
6. Коррозия, эрозия	Превышение допустимого изменения массы, толщины металла; образование критической плотности каверн, язв; превышение допустимой глубины коррозионного повреждения	Направляющие и лопатки газотурбинных установок, трубы паровых котлов, элементы трубопроводов, гребные винты, рабочие камеры гидротурбин, кабины, кузова, котельные установки, детали насосов, латунные, дюралюминиевые, магниевые сплавы и др.
7. Старение	Недопустимое необратимое изменение физико-механических свойств материалов деталей (потеря прочности, твердости, пластичности, эластичности и др.)	Элементы и детали из полимеров, резинотехнические изделия, уплотнения, полупроводники



2 ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ



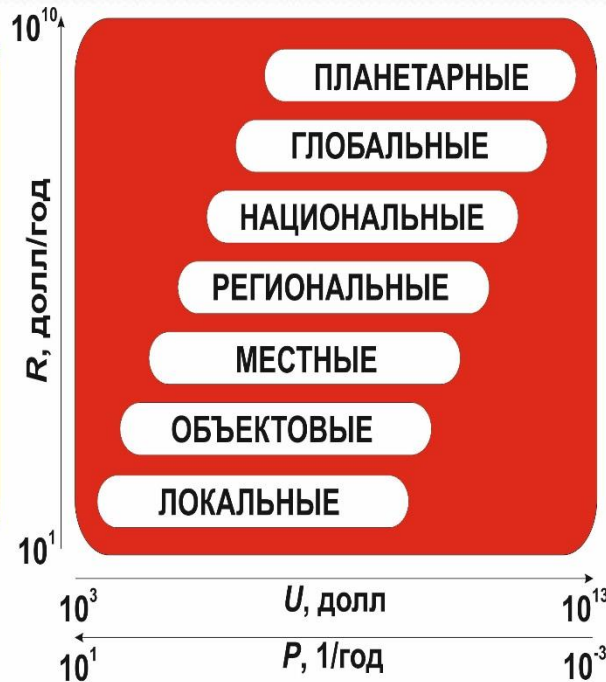
Таблица 3 - Классификация объектов по последствиям отказа

Отказ	Последствия отказа	Допустимая вероятность безотказной работы	Тип машины
Тяжелые (катастрофические)	Авария Катастрофа Невыполнение ответственного задания	$P(t) \rightarrow 1$	Летательные аппараты Подъемно-транспортные машины Военная техника Машины химического производства Медицинское оборудование
Средние (экономический ущерб)	Повышенные простои в ремонте Работа на пониженных режимах Работа с ухудшенными параметрами	Значительный ущерб $P(t) \geq 0,99$ Незначительный ущерб $P(t) \geq 0,9$	Технологическое оборудование Сельскохозяйственные Бытовые
Легкие	Без	$P(t) \ll 0,9$	Отдельные узлы и элементы

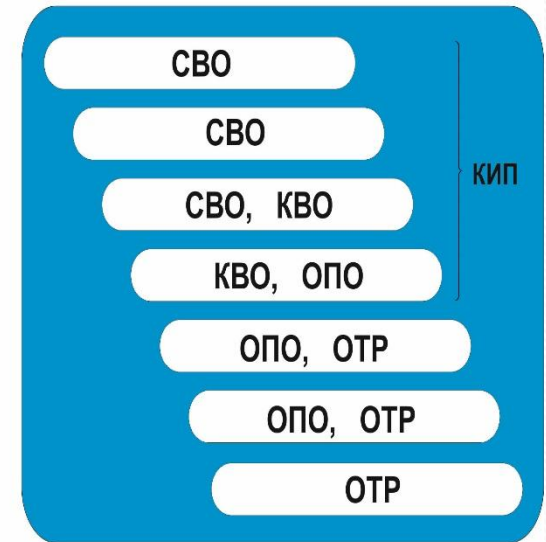
ОБЩАЯ СТРУКТУРА АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПО КРИТЕРИЯМ РИСКА



Типы аварийных ситуаций



Классы аварий, катастроф и рисков



Типы объектов инфраструктуры



2 ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ



**Таблица 4 - Количество отказов рельсов длиной 25 м на первой линии
Минского метрополитена (общее количество рельсов – 2000 шт.)**

Год	Частичные отказы	Полные отказы	Всего
1984	0	2	2
1985	2	0	2
1986	7	0	7
1987	5	3	8
1988	0	6	6
1989	5	3	8
1990	5	1	6
1991	8	1	9
1992	23	1	24
1993	8	2	10
1994	13	0	13
1995	10	0	10
1996	8	1	9
1997	10	5	15
1998	11	2	13
1999	11	4	15
2000	15	5	20
2001	8	2	10
2002	7	0	7
2003	16	3	19
2004	8	1	9
Всего, n	180	42	222



2 ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ



$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{X}^2$$

$$v = \frac{S}{\bar{X}}$$



2 ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ



Определим основные параметры распределения отказов рельсов в среднем за год:

– для частично отказавших рельсов

$$\bar{X} = (0 + 2 + \dots + 8) / 21 = 8,571 \text{ шт./год};$$

$$S^2 = \frac{1}{21} \left((0^2 + 2^2 + \dots + 8^2) - 21 \cdot 8,571^2 \right) = 28,765;$$

$$S = \sqrt{28,765} = 5,363 \text{ шт./год};$$

$$v = \frac{5,363}{8,571} = 0,626;$$

– для полностью отказавших рельсов

$$\bar{X} = (2 + 0 + \dots + 1) / 21 = 2,000 \text{ шт./год};$$

$$S^2 = \frac{1}{21} \left((2^2 + 0^2 + \dots + 1^2) - 21 \cdot 2,000^2 \right) = 3,300;$$

$$S = \sqrt{3,300} = 1,816 \text{ шт./год};$$

$$v = \frac{1,816}{2,000} = 0,908;$$



2 ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

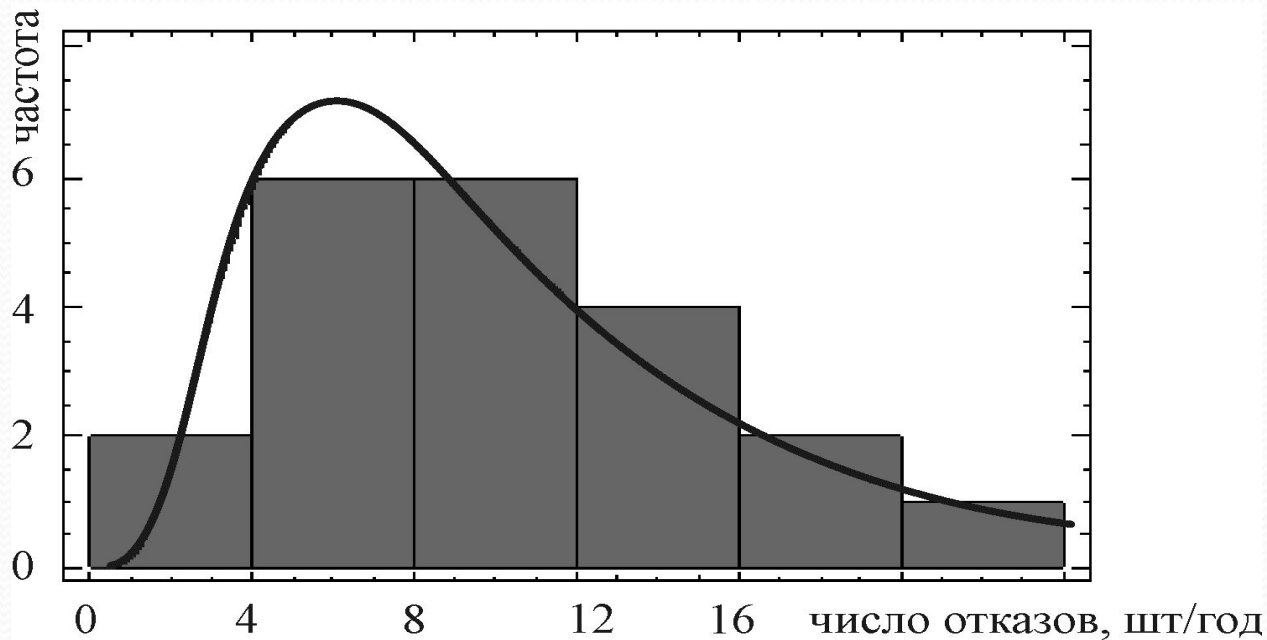
– для всех отказавших рельсов

$$\bar{X} = (2 + 2 + \dots + 9) / 21 = 10,571 \text{ шт./год};$$

$$S^2 = \frac{1}{21} \left(\frac{1}{1} \left(2^2 + 2^2 + \dots + 9^2 \right) - 21 \cdot 11,000^2 \right) = 21,650;$$

$$S = \sqrt{21,650} = 4,653 \text{ шт./год};$$

$$v = \frac{4,653}{10,571} = 0,440.$$





2 ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

