

Современные тенденции развития наноинженерии

Лекция. Проблема надежности технических систем в наноинженерии

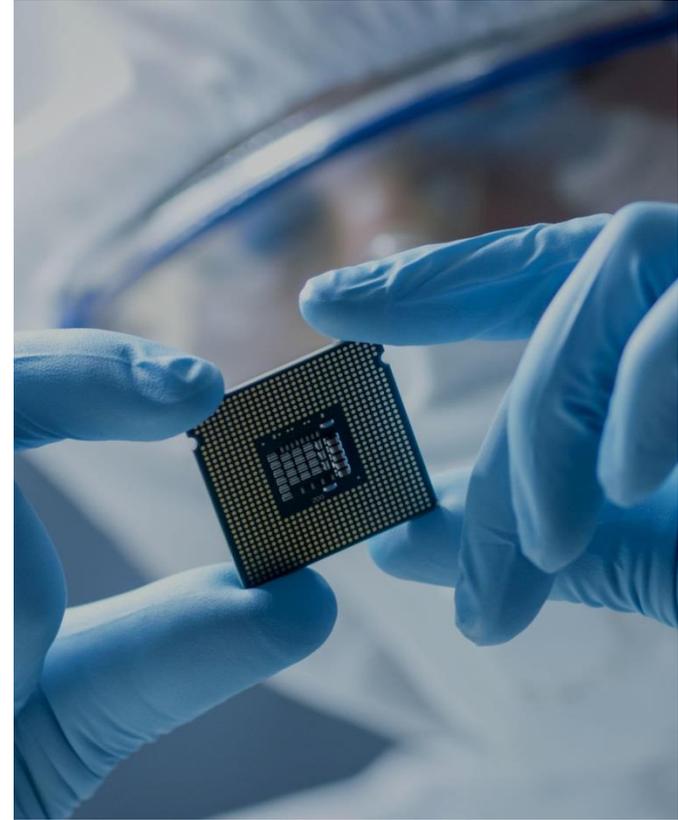
Преподаватель – доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры кибернетики химико-технологических
процессов

Савицкая Татьяна Вадимовна

Некоторые понятия и определения наноинженерии

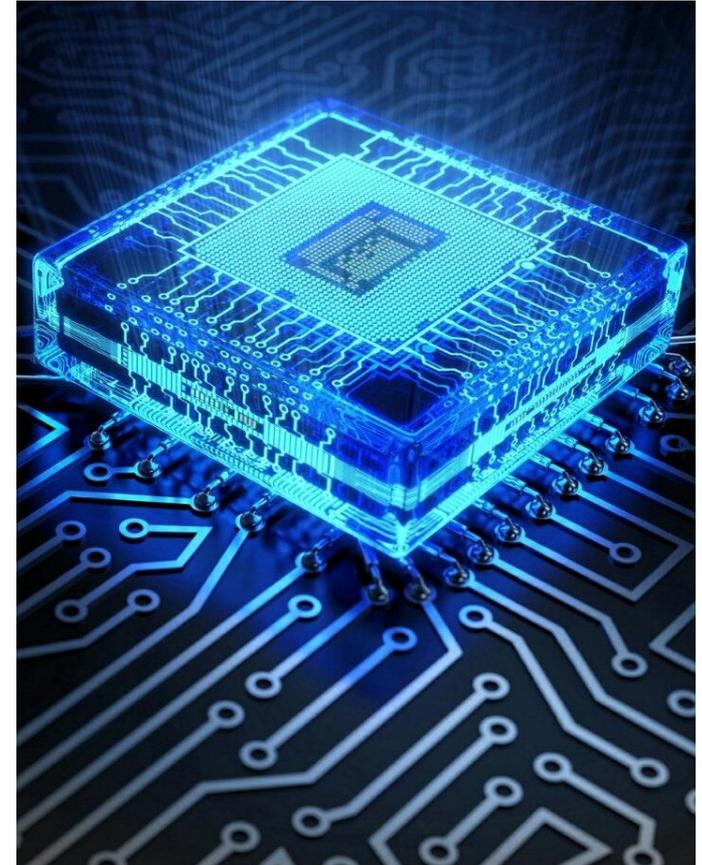
Наноинженерия (от нано- и инженерия) – научно-практическая деятельность человека по конструированию, изготовлению и применению наноразмерных (наноструктурированных) объектов или структур, а также объектов или структур, созданных методами нанотехнологий.

Нанотехнологии – одна из важнейших и быстроразвивающихся областей современной научно-практической деятельности. Современные знания в области нанотехнологий существенно меняют представление о взаимодействии материалов и систем с человеком и окружающей средой.



Некоторые понятия и определения наноинженерии

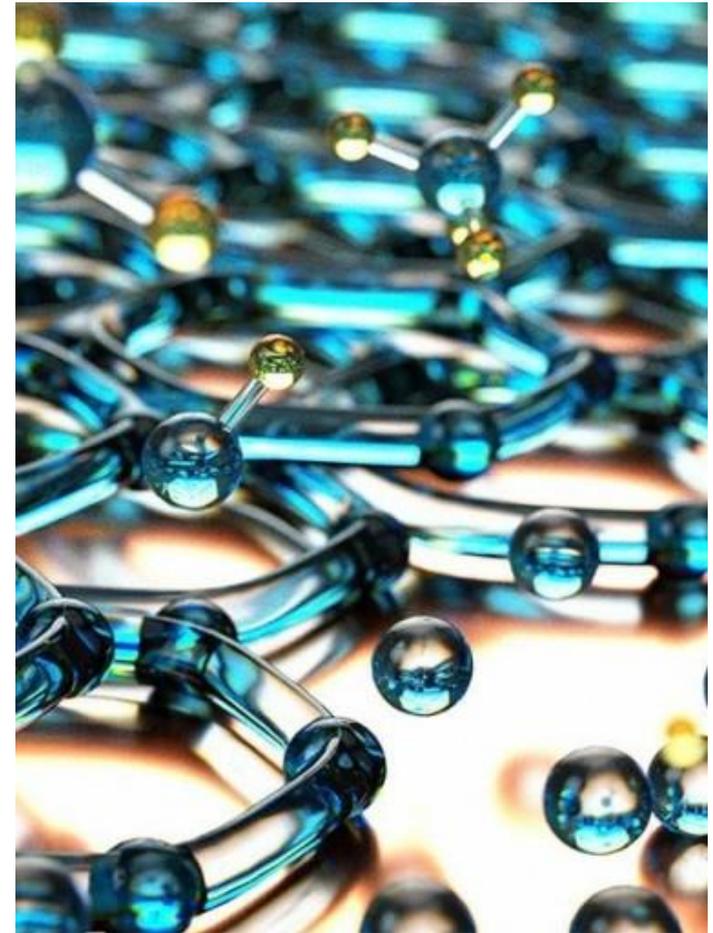
Нанотехнология – это совокупность технологических методов и приемов, используемых при исследовании, проектировании и производстве материалов, устройств и систем, включая контроль и управление их структурой, химическим составом и взаимодействием составляющих их отдельных наномасштабных элементов (с размерами порядка 100 нм и меньше хотя бы по одному из измерений), направленные на улучшение или появление новых эксплуатационных и потребительских характеристик и свойств продукции.



Ключевыми понятиями

нанотехнологии являются:

- **нанообъект** – дискретная часть материи или ее локальное отсутствие (пустоты, поры), размер которой хотя бы в одном измерении находится в нанодиапазоне (как правило, 1-100 нм).
- **наноструктура** – совокупность нанообъектов искусственного или естественного происхождения, свойства которой определяются не только размером структурных элементов, но и их взаимным расположением.



Нанотехнологии охватывают разработку и применение материалов, устройств и систем с существенно **новыми свойствами и функциями**, которые возникают при размерах частиц материала в диапазоне 1-100 нм. Новые эксплуатационные или потребительские свойства продуктов могут возникать вследствие реализации нанотехнологических переделов, т.е. манипуляции на уровне единиц-сотен нанометров с материей (частицами, пленками, объемными структурами и т.д.).

В нанообъектах физические, химические и биологические свойства материалов **существенно отличаются** от свойств отдельных атомов и молекул или сыпучих веществ. Нанообъекты, по сравнению с тем же веществом в виде микро- и макроструктур, могут менять свои механические, оптические, магнитные и электронные свойства, а также способность к химическим реакциям, что приводит к **новым способам** их применения в промышленности, здравоохранении и производстве продукции.

Выделяют **два основных вида нанообъектов** – пассивные и активные.

К **пассивным нанообъектам** относят наноструктуры с неизменными свойствами. В основном пассивные нанообъекты применяют для изготовления наносистем.

К активным нанообъектам относят:

- ***Активные наноструктуры и наноустройства*** с изменяющимися свойствами. Эти структуры изменяют свои свойства *при функционировании*. Сферой применения активных наноструктур является использование их в качестве компонентов устройств и систем, например таких, как наноэлектромеханические системы, наносенсоры или наноустройства, применяемые в медицине, которые изменяют свою структуру и/или свойства в процессе использования.
- ***Интегрированные системы активных наночастиц***, позволяющие создавать сети и масштабированные *иерархические структуры* нанометрового размера. Применение интегрированных наносистем является базой для создания искусственных биологических тканей и устройств.
- ***Гетерогенные молекулярные наносистемы***, размеры компонентов которых сопоставимы с размерами наноструктур. При этом элементы наноструктур выполняют *различные функции* в наносистемах. Например, молекулы могут быть использованы как устройства или спроектированы для компоновки наносистем. Направлением применения гетерогенных молекулярных наносистем являются генетические методы лечения.

Наносистема – система, содержащая структурные элементы, нанообъекты, линейный размер которых хотя бы в одном измерении имеет величину, составляющую 1 – 100 нм, и определяющий основные свойства и характеристики этой системы.

Она представляет собой *материальный объект* в виде упорядоченных или самоупорядоченных связанных между собой элементов с нанометрическими характеристическими размерами, кооперация которых обеспечивает возникновение у объекта *новых свойств*, обусловленных проявлением наномасштабных эффектов и явлений (например, квантово-размерных, синергетически-кооперативных, «гигантских» и др.).

Фундаментальным **базисом нанотехнологий** являются физика, химия и молекулярная биология. *Большую роль играют также прикладная математика и компьютерное моделирование* наноструктур на основе квантово-механических закономерностей поведения объектов, состоящих из счетного числа атомов или молекул.

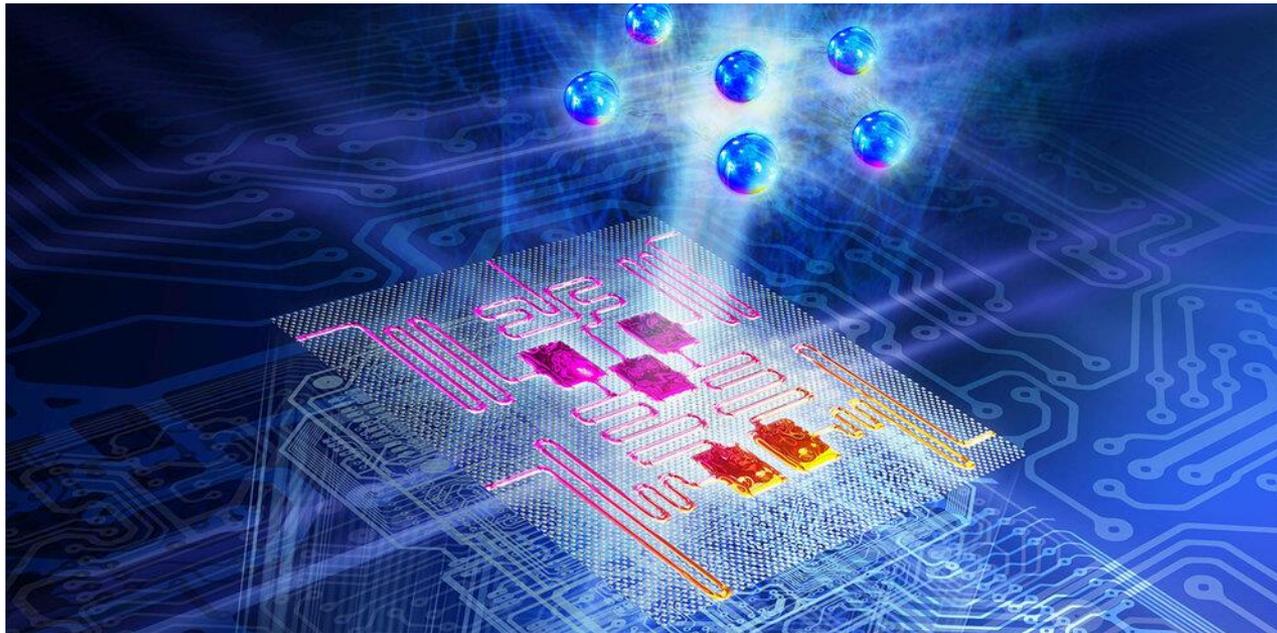
Как любая сложная система наносистема может быть представлена *иерархической структурой*.



Рис. 1. Иерархическая структура наносистемы

Зачастую нанотехнологии позволяют создавать готовые изделия, содержащие **миллионы элементов**, минуя стадию производства материалов и отдельных деталей, их последующей обработки и сборки.

Наибольшее распространение такие **интегральные технологии** получили в **твердотельной электронике**, в частности, в так называемой планарной **микро- и наноэлектронике**, когда на поверхности полупроводниковой пластины создаются **десятки и сотни миллионов** наномасштабных элементов **большой интегральной схемы (БИС)**. Чаще всего такие интегральные схемы **на одном чипе** (как правило, на пластинке из сверхчистого монокристаллического кремния) используют в качестве микропроцессоров или блоков оперативной памяти в персональных компьютерах.



Проблема надежности в электронике возникла в начале пятидесятых годов XX века, когда развитие техники привело к необходимости создания сложной радиоэлектронной аппаратуры. Возросшее значение проблемы качества и надежности *было обусловлено:*

- быстрым развитием науки и техники в электронике, аппаратостроении, авиа- и ракетостроении, приборостроении, машиностроении и др.;
- усложнением производственного процесса вследствие применения современного оборудования, средств механизации и автоматизации;
- расширением отраслевой, межотраслевой и международной специализации и кооперации;
- расширением объемов и номенклатуры производства, увеличением числа предприятий, выпускающих однотипные изделия.

Теория надежности – сравнительно молодая научно-техническая дисциплина, формирование которой в современном виде относится к 50-м годам XX столетия.

Под *теорией надежности* понимают научную дисциплину, которая изучает закономерности *сохранения во времени* техническими системами свойства выполнять *требуемые функции* в заданных режимах и условиях применения (эксплуатации), технического обслуживания, ремонтов и транспортирования.

Основные вопросы, которые изучает теория надежности:

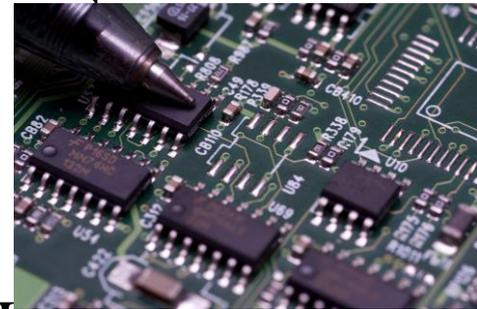
- *отказы* технических элементов (средств, систем);
- критерии и количественные характеристики надежности;
- методы анализа и повышения надежности элементов и систем на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации;
- методы испытания технических средств на надежность;
- методы оценки эффективности повышения надежности.

В конкретных областях техники разрабатывались и продолжают разрабатываться **прикладные вопросы** надежности, вопросы обеспечения надежности данной конкретной техники (радиоэлектронные приборы, средства вычислительной техники, транспортные машины, продуктопроводы, химические реакторы и т.д.). При этом решается вопрос о наиболее рациональном использовании *общей теории* надежности в конкретной области техники и ведется разработка таких новых положений, методов и приемов, которые отражают специфику данного вида техники. Так возникла **прикладная теория надежности**.

Теория надёжности представляет собой прикладную научную дисциплину, в которой разрабатываются и изучаются методы обеспечения эффективности функционирования **технических объектов** различного типа (механических изделий, изделий электроники, включая *микро- и наноэлектронику*, простых устройств, сложных технологических комплексов и т.п.) в процессе эксплуатации.

Области расчета надежности

- Химическая технология,
- Автоматизированные системы управления,
- Информационно-коммуникационные сети,
- Опасные производства,
- Микро- и наноэлектроники.



Как и любая область науки, теория надёжности обладает собственным языком описания исследуемых явлений. Функционирование объектов во времени с позиций теории надёжности описывается математическими моделями, поэтому язык теории надёжности – это математика.

Теория надёжности при решении конкретных задач использует развитый математический аппарат:

- теорию вероятностей,
- прикладную математическую статистику,
- теорию случайных процессов,
- теорию массового обслуживания,
- теорию графов,
- дифференциальное и интегральное исчисление
- многие специальные математические дисциплины.

В своем развитии *теория и практика надежности* прошли **несколько этапов.**

На первом этапе систематизировались данные по *отказам* аппаратуры и комплектующих изделий, исследовались и определялись законы распределения отказов во времени, разрабатывалась единая терминология в области надежности, создавались методы расчета надежности аппаратуры и ее элементов, *накапливался статистический материал* о количественных показателях надежности. Сложившаяся на этом этапе практика контроля качества и надежности ИМС не всегда удовлетворяла возрастающим требованиям, а иногда и сдерживала темпы развития. Это объясняется многими *факторами*, основными из которых являются:

- быстрый рост *функциональной сложности* приборов;
- недостаточная эффективность сложившихся методов контроля качества и оценки надежности ИМС и изготавливаемой на их основе микроэлектронной аппаратуры (МЭА);
- сложность и *многообразие технологических процессов* изготовления ИМС, постоянное совершенствование конструкций, использование новых материалов и видов оборудования;
- неподготовленность разработчиков к проектированию аппаратуры на основе ИМС с учетом их особенностей.

На последующем этапе, характеризующемся более глубоким проникновением в суть надежности характеристик приборов, разрабатывались *требования* по надежности аппаратуры и приборов, формировались все более объективные и *информативные методы испытаний* их на надежность. Значительная роль в этом случае отводится различным *испытаниям*, по анализу результатов которых принимают решения о целесообразности дальнейшего производства данных изделий, совершенствования их конструкции и технологии изготовления, уточняются условия эксплуатации, хранения, транспортировки и т.п.

В технологический процесс производства ИМС при необходимости вводится более детальный *контроль* промежуточных операций и выходной контроль готовых приборов. В производство все шире внедряются *статистические методы контроля*, позволяющее своевременно корректировать технологический процесс с целью недопущения брака на промежуточных и заключительных операциях. В повседневную практику внедрялось *изучение причин отказов* в аппаратуре с целью выработки корректирующих мероприятий по их устранению.

На **современном этапе** возникла необходимость в разработке новых методов оценки надежности ИМС и изготовленных на их основе приборов. Поэтому сложились и заняли прочные позиции *фундаментальные направления теории надежности*. Среди них в первую очередь следует указать на формирование *математической теории надежности*, явившейся исходным пунктом становления науки о надежности вообще. Развитие методов *сбора и обработки статистических данных* надежности послужило основой формирования *статистической теории надежности*.

Разнообразные и обширные исследования в области физико-химических процессов, обуславливающих изменение физических и электрических параметров материалов и приборов, явились базой становления *физической теории надежности*. Формирование последнего направления в науке о надежности позволило от пассивного наблюдения статистических данных по надежности перейти к *углубленному изучению причин возникновения отказов*, выявлению механизмов деградации характеристик материалов и параметров приборов, к активному воздействию на технологические процессы и конструкцию приборов посредством научно обоснованных корректирующих действий.

Наиболее характерными чертами современной полупроводниковой электроники являются *рост сложности приборов* и *уменьшение геометрических размеров отдельных элементов полупроводниковых структур*. Ежегодно **сложность ИМС примерно удваивается**, а рост степени интеграции вызывается ростом их функциональной сложности.

Эту эмпирическую закономерность установил один из основателей корпорации *Intel*, Гордон Мур в середине 1960-х гг. Согласно «закону» Мура, **каждые два года число транзисторов на микросхеме удваивается**. И этот «закон» до сих пор успешно работает, хотя с 2008 г. темп роста немного замедлился.

Сейчас количество транзисторов на одном чипе, одной ячейке микросхемы компьютера характерного размера 1 см^2 , достигает **несколько десятков миллиардов**. Согласно данным официальной статистики, к 2015 г. минимальный **размер транзистора по сравнению с 1971 г. уменьшился в 715 раз!** Если бы, к примеру, железная дорога развивалась такими темпами, то мы бы сейчас от Москвы до Новосибирска доезжали за 4 минуты.

Уменьшение геометрических размеров элементов ИМС делает *исключительно острой* проблему **качества** исходных материалов и **совершенства** технологических процессов изготовления приборов. Из-за этого уменьшения, изготавливаемые ИМС весьма чувствительны к *дефектам* с размерами, приближающимися к атомным.

В этих условиях становится исключительно важным знание дефектности *исходных материалов*, причин возникновения дефектов в процессе *изготовления* полупроводниковых структур, *эволюции* дефектов на последующих этапах жизненного цикла приборов и их *влияния* на *надежность*.

Следует особо подчеркнуть, что **изучение механизмов отказов** приборов должно осуществляться с учетом **не только внутренних** физико-химических процессов, происходящих в них, но и всех условий **окружающей среды** и всех факторов **внешних воздействий**, которые во многих случаях играют доминирующую роль в развитии тех или иных процессов деградации параметров.

Высокая надежность ИМС обусловила несколько **проблем**, связанных с методами *оценки их надежности*.

Первая из проблем заключается в том, что обычные методы определения надежности становятся все менее приемлемыми из-за снижения интенсивности отказов ИМС. Эта проблема приводит к необходимости проводить испытания *при нагрузках значительно превышающих номинальные*. Сами же нагрузки необходимо выбирать такими, чтобы механизм отказов соответствовал отказам, возникающим в нормальном рабочем режиме.

Вторая проблема связана с необходимостью улучшения параметров и уменьшения размеров ИМС, что неотвратимо ведет к изменениям и усовершенствованиям *технологических процессов* производства. Поэтому могут возникать *новые механизмы* отказов, следовательно, необходимо вводить новые критерии оценки надежности и разрабатывать *новые модели* физико-химических процессов, объясняющих деградацию и последующие отказы ИМС.

Основные понятия теории надежности технических систем

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

Предметом рассмотрения теории надежности является любой *технический объект*.

Объектом может быть сборочная единица, деталь, компонент, элемент, устройство, функциональная единица, оборудование, изделие, система, сооружение. Объект может включать в себя аппаратные средства, программное обеспечение, персонал или их комбинации.

Надежность объекта (компонента, детали, изделия и т.п.) зависит от этапов ее создания и условий эксплуатации. Поэтому в отношении надежности изделия устанавливают следующие этапы:

- конструктивная надежность *при проектировании*;
- производственная надежность, которая определяется степенью соответствия производства (т.е. *технологических процессов*) технической документации;

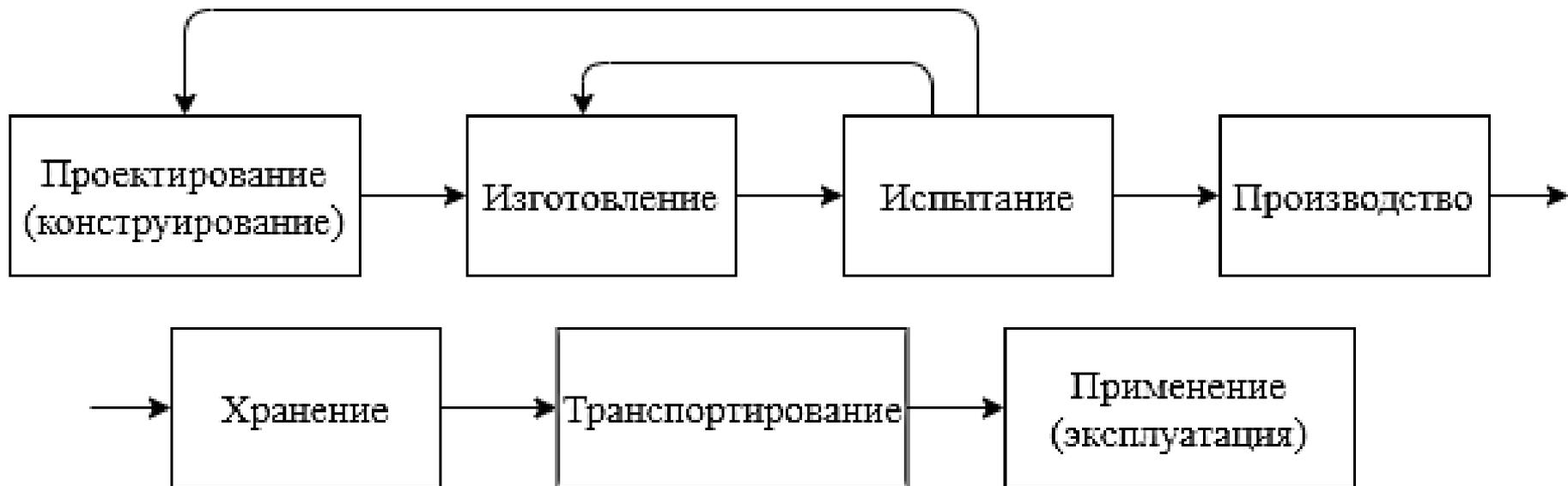


Рис. 2. Этапы создания объекта

Слова «во времени» означают естественный ход времени, в течение которого имеет место применение, техническое обслуживание, хранение и транспортирование объекта, а не какой-либо конкретный интервал времени.

Одним из ключевых понятий теории надежности является понятие **отказ**.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Отказ может быть *полным* или *частичным*.

Полный отказ характеризуется переходом объекта в неработоспособное состояние.

Частичный отказ характеризуется переходом объекта в частично неработоспособное состояние.

Дефект – каждое отдельное *несоответствие* объекта требованиям, установленным документацией.

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

Дефект и (или) повреждение могут служить *причиной* возникновения частичного или полного отказа объекта.

Наличие дефекта и (или) повреждения *приводит объект в неисправное состояние*.

Виды, критерии отказов, классификация отказов

Вид отказа – единица классификации отказов на основе установленных критериев:

- особенностей, причины и последствий отказа,
- функции, способность выполнения которой утрачена в результате отказа,
- или изменения состояния объекта.

Критерий отказа – признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в документации.

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

Причины отказа могут быть как в пределах объекта (*внутренние причины*), так и вне его (*внешние причины*).

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

В некоторых случаях при анализе может быть необходимым рассматривать отдельные виды отказов и их последствия.

Последствия отказа могут быть как в пределах объекта, так и вне его.

Критичность отказа – совокупность признаков, характеризующих значимость последствий отказа.

Классификация отказов по критичности: критический, некритический (например, по уровню прямых и косвенных потерь, связанных с возникновением отказа, или по трудоемкости устранения последствий отказа), устанавливается документацией на основании технического и экономического анализа.

Например, существует такой метод анализа отказов, который называется метод **«Анализа вида, последствий и критичности отказа» (метод АВПКО).**

В этом случае *каждый вид отказа* предлагается ранжировать с учетом двух аспектов *критичности* – вероятности (или частоты) и *тяжести последствий отказа*, уровни которых определяют приоритетность мер безопасности.

Исследование проводится с использованием **матрицы «частота-тяжесть последствий».**

Матрица «частота-тяжесть последствий»

Частота возникновения событий, год ⁻¹		Тяжесть последствий			
		Катастрофическое событие	Критическое событие	Некритическое событие	Событие с пренебрежимо малыми последствиями
Частое событие	>1	A	A	A	C
Вероятное событие	1-10 ⁻²	A	A	B	C
Возможное событие	10 ⁻² - 10 ⁻⁴	A	B	B	C
Редкое событие	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	A	B	C	D
Практически и невероятное событие (очень редкое событие)	< 10 ⁻⁶	B	C	C	D

В этой матрице буквенными обозначениями обозначены 4 уровня.

A – риск выше допустимого, требуется разработка дополнительных мер безопасности;

B. – риск ниже допустимого при принятии дополнительных мер безопасности;

C. – риск ниже допустимого при осуществлении контроля принятых мер безопасности;

D – риск пренебрежимо мал, анализ и принятие дополнительных мер безопасности не требуется.

Заметим, что риск считается недопустимым, если его значение превышает 10^{-6} .

Рекомендуемая градация по тяжести последствий:

Катастрофическое событие – приводит к нескольким смертельным исходам для персонала, полной потере объекта, невосполнимому ущербу окружающей среде;

Критическое событие – угрожает жизни людей, приводит к существенному ущербу имуществу и окружающей среде;

Некритическое событие – не угрожает жизни людей, возможны отдельные случаи травмирования людей, не приводит к существенному ущербу имуществу или окружающей среде;

Событие с пренебрежимо малыми последствиями – событие, не относящееся по своим последствиям ни к одной из первых трех категорий.

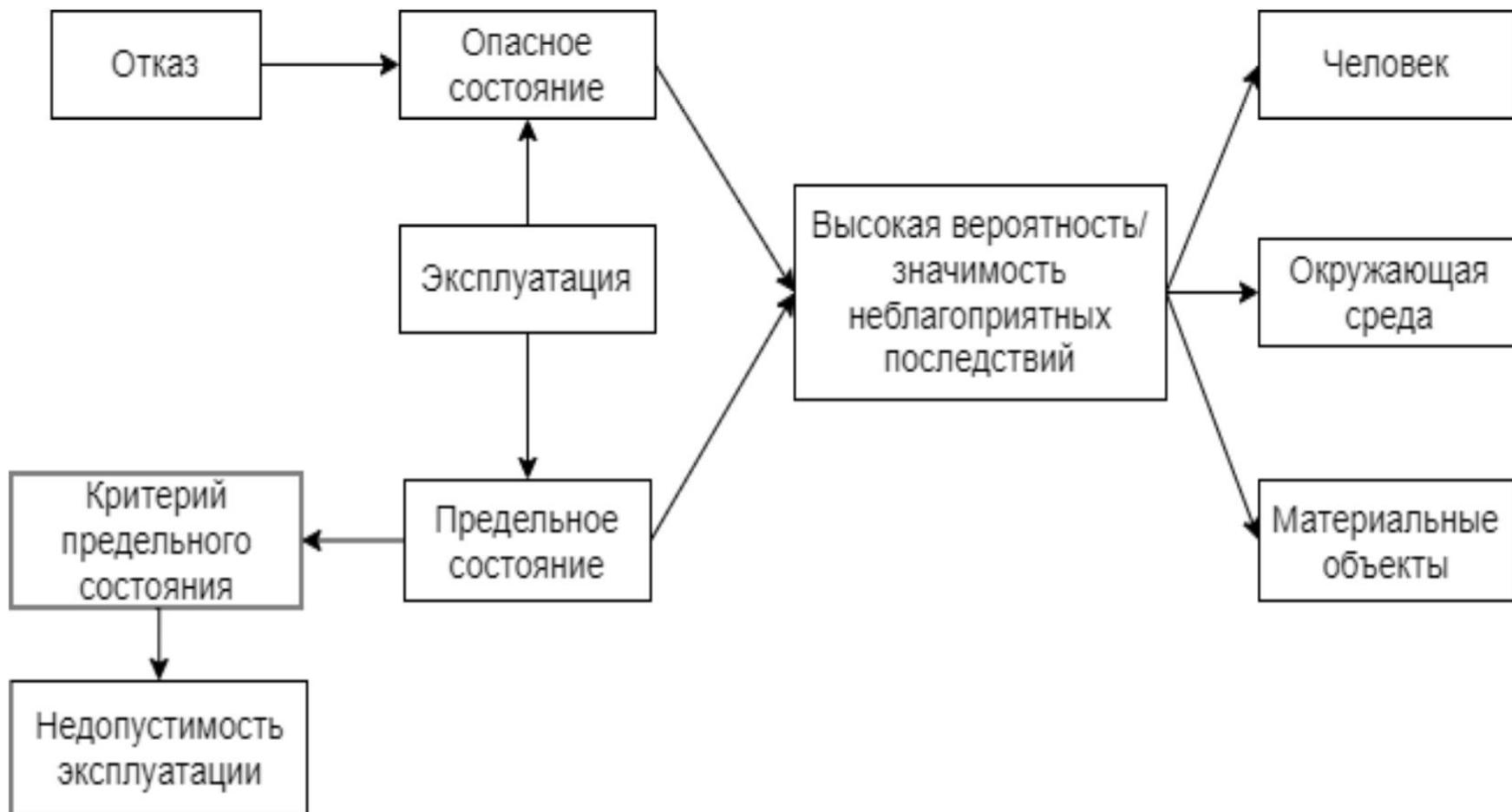


Рис. 3. Различные состояния объектов

Продолжим рассматривать *классификацию отказов технической системы на различных стадиях жизненного цикла.*

Понятие	Определение
Конструктивный отказ	Отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством конструкции или нарушением установленных правил и (или) норм <i>проектирования и конструирования.</i>
Производственный отказ	Отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или его ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии.
Эксплуатационный отказ	Отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации.
Независимый отказ	Отказ, не вызванный возникновением других отказов.
Зависимый отказ	Отказ, вызванный возникновением других отказов.
Внезапный отказ	Отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние.
Постепенный отказ	Отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта.
Систематический отказ	<p>Отказ, однозначно вызванный определенной причиной, которая может быть устранена только модификацией проекта или производственного процесса, правил эксплуатации и документации.</p> <p>Систематический отказ может быть воспроизведен путем преднамеренного создания тех же самых условий, например, с целью определения причины отказа.</p> <p>Систематический отказ является результатом систематической неисправности.</p>

Понятие	Определение
Сбой	Самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.
Перебегающий отказ	Многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера. В технической документации должен быть установлен критерий понятия "многократно" возникающий отказ.
Явный отказ	Отказ, <i>обнаруживаемый</i> визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения.
Скрытый отказ	Отказ, <i>не обнаруживаемый</i> визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования.
Деградиционный отказ	Отказ, обусловленный естественными процессами старения, износа, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации объекта.
Ресурсный отказ	Отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.
Механизм отказа	Процесс, который приводит к отказу. Процесс может быть, например, физическим, химическим, биологическим, логическим или их сочетанием.

Различают также:

- **отказы по общей причине** – отказы *различных объектов*, возникающие вследствие *одного события* (отказа, ошибки персонала, внешнего или внутреннего воздействия), которые без рассмотрения причин считались бы независимыми.

К числу таких **причин** могут быть отнесены следующие:

- *конструкторские недоработки* оборудования (дефекты, не выявленные на стадии проектирования);
- *ошибки эксплуатации и технического обслуживания* (неправильная регулировка или калибровка, небрежность оператора, неправильное обращение и т. д.);
- *воздействие окружающей среды* (пыль, грязь, температура, вибрация, а также экстремальные режимы нормальной эксплуатации);
- *внешнее катастрофическое воздействие* (естественные внешние явления, такие, как наводнение, землетрясение, пожар, ураган);
- *общий изготовитель* (резервируемое оборудование или его компоненты, поставляемые одним и тем же изготовителем, могут иметь общие конструктивные или производственные дефекты. Например, производственные дефекты могут быть вызваны неправильным выбором материала, ошибками в схемах монтажа, некачественной пайкой и т.п.);
- *общий внешний источник питания* (общий источник питания для основного и резервного оборудования, резервируемых подсистем или элементов);
- *неправильное функционирование* (неверно выбранный комплекс измерительных приборов или неудовлетворительно спланированные меры защиты).

Отказы по общей причине могут быть также отказами **общего вида** – отказы различных объектов, характеризующиеся одним и тем же *видом* отказа.

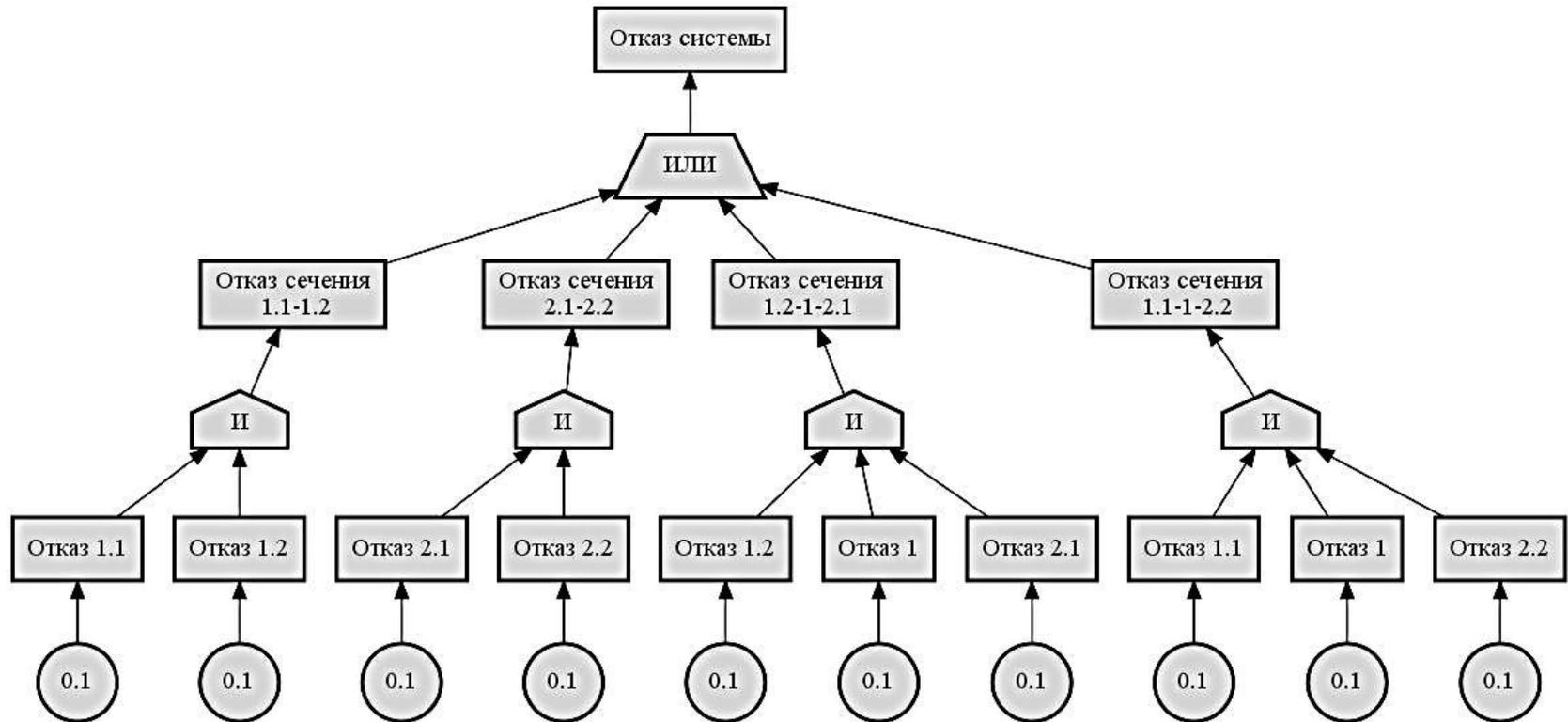
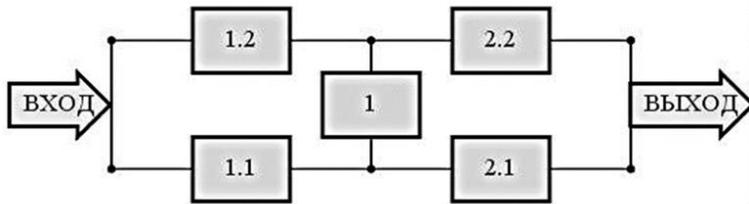
У отказов общего вида могут быть также и *различные* причины.

Приведем *несколько примеров различных источников и причин изменения начальных параметров технической системы и возникновения отказов.*

Изменения, которые происходят с течением времени в любой технической системе и приводят к потере ее работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями, которым она подвергается. В процессе эксплуатации на систему действуют *все виды энергии*, что может привести к изменению параметров отдельных элементов, механизмов и системы в целом. При этом имеется *три основных источника воздействий*:

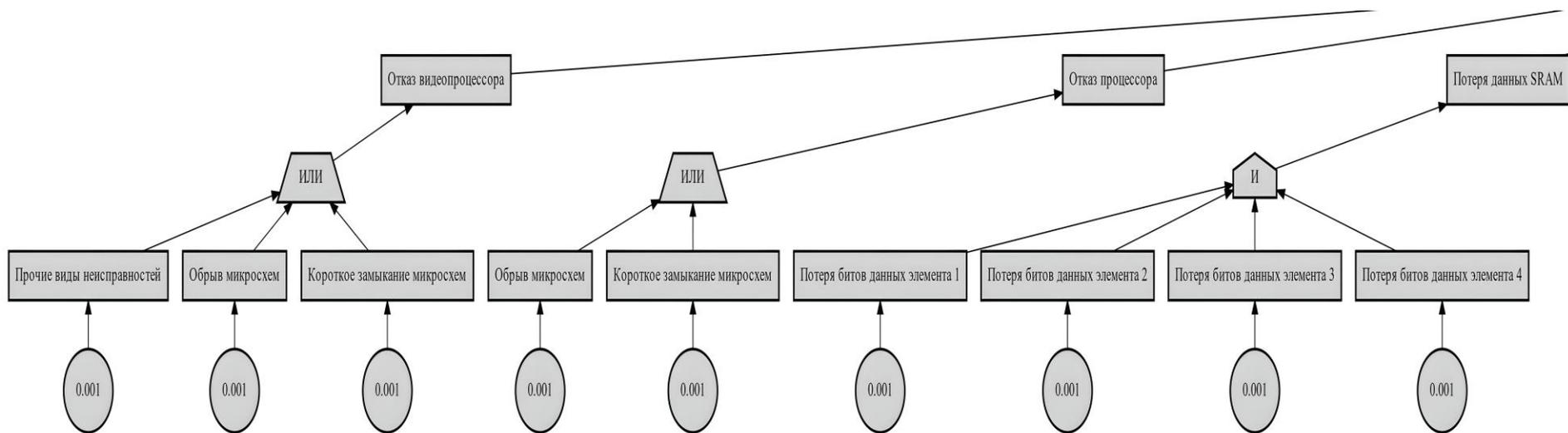
- действие *энергии окружающей среды*, включая человека, исполняющего функции оператора или ремонтника;
- *внутренние источники энергии*, связанные как с рабочими процессами, протекающими в технической системе, так и с работой отдельных элементов системы;
- *потенциальная энергия*, которая накоплена в материалах и деталях узлов системы в процессе их изготовления (внутренние напряжения в отливке, монтажные напряжения).

Деревья отказов



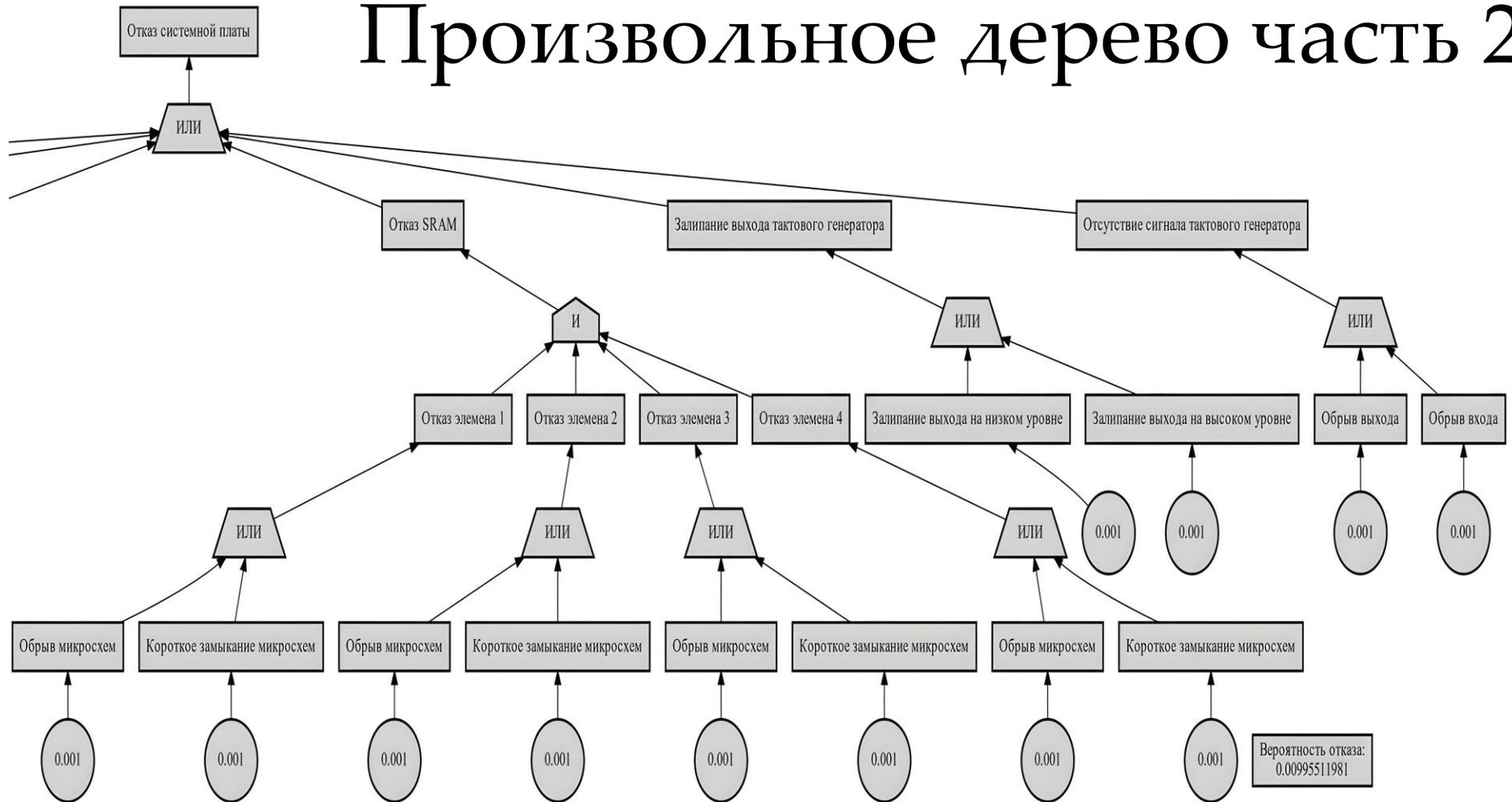
Дерево отказов по сечениям

Произвольное дерево часть 1



Пример взят: Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: ЛЕНАНД, 2016. 256 с

Произвольное дерево часть 2



Окончательный результат: вероятность отказа = 0,009955, интенсивность отказа = 0,1 год⁻¹

Пример взят: Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: ЛЕНАНД, 2016. 256 с

При работе технического объекта наблюдаются следующие основные *виды энергии*, влияющие на его работоспособность.

Механическая энергия, которая не только передается по всем элементам системы в процессе работы, но и воздействует на нее в виде статических или динамических нагрузок от взаимодействия с внешней средой.

Силы, возникающие в узлах технической системы, определяются характером рабочего процесса, инерцией перемещающихся частей, *трением в кинематических парах*. Эти силы являются *случайными функциями* времени. Природа их возникновения, как правило, связана со сложными физическими явлениями.

Механическая энергия в системе может возникнуть и как следствие тех затрат энергии, которые имели место при *изготовлении* отдельных частей системы и сохранились в них в потенциальной форме. Например, деформация частей при перераспределении внутренних напряжений, изменение объема детали после ее термической обработки происходят без всяких внешних воздействий.

Тепловая энергия действует на систему и ее части при колебаниях температуры окружающей среды, при осуществлении рабочего процесса.

Химическая энергия также оказывает влияние на работу системы. Даже воздух, который содержит влагу и агрессивные составляющие, может вызвать *коррозию* отдельных узлов системы.

Если же оборудование системы работает в условиях агрессивных сред (оборудование химической промышленности, суда, многие машины текстильной промышленности и др.), то химические воздействия вызывают процессы, приводящие к разрушению отдельных элементов и узлов системы.

Ядерная (атомная) энергия, выделяющаяся в процессе превращения атомных ядер, может воздействовать на материалы (особенно в космосе), изменяя их свойства.

Электромагнитная энергия в виде радиоволн (электромагнитных колебаний) пронизывает все пространство вокруг объекта и может оказать влияние на работу электронной аппаратуры.

Биологические факторы также могут влиять на работоспособность системы. Например, в тропических странах имеются микроорганизмы, которые не только разрушают некоторые виды пластмасс, но даже могут воздействовать на металл.

Таким образом, *все виды энергии* действуют на техническую систему и ее механизмы, вызывают в ней целый ряд нежелательных процессов, создают условия для ухудшения ее технических характеристик.

Коррозия – самопроизвольное разрушение металлов и сплавов в результате химического, электрохимического или физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Разрушение по физическим причинам не является **коррозией**, а характеризуется понятиями «эрозия», «истирание», «износ». Причиной **коррозии** служит термодинамическая неустойчивость конструкционных материалов к воздействию веществ, находящихся в контактирующей с ними среде.

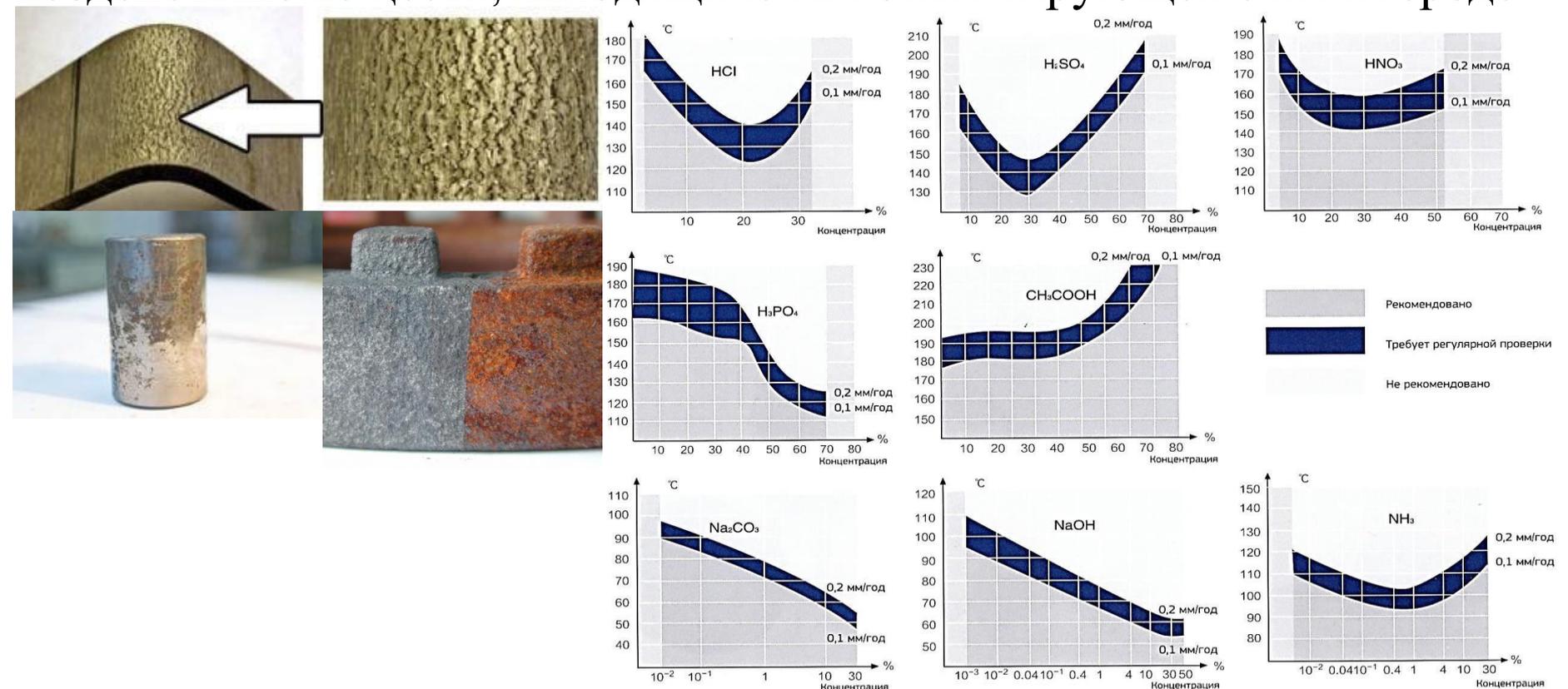


Рис. 4. Коррозионная стойкость эмали в различных средах

Испытания на надежность технических систем

Испытания на надежность – испытания, проводимые с целью оценки и/или контроля показателей надежности в заданных условиях.

Испытания проводят с заданной точностью (т.е. при заданной относительной погрешности) и с заданной достоверностью (т.е. при заданном уровне доверительной вероятности).

Испытания на надежность могут быть как самостоятельными, так и входить в состав приемо-сдаточных, приемочных, типовых, периодических, квалификационных и других испытаний.

Различают следующие испытания на надежность.

Понятие	Определение
Определительные испытания на надежность	Испытания, проводимые для определения оценок показателей надежности.
Контрольные испытания на надежность	Испытания, проводимые для проверки соответствия показателей надежности установленным требованиям
Лабораторные испытания на надежность	Испытания, проводимые в лабораторных (или заводских) условиях. Испытания проводятся в заданных и контролируемых условиях, с имитацией или без имитации эксплуатационных условий. Испытания с имитацией относят к <i>нормальным испытаниям</i> на надежность.
Эксплуатационные испытания на надежность	Испытания проводимые в реальных условиях эксплуатации объекта. При проведении испытания рекомендуется проводить мониторинг и регистрацию рабочих и окружающих условий, а также режимов технического обслуживания и измерений.
Нормальные испытания	Лабораторные испытания на надежность, методы, режимы и условия проведения которых максимально приближены к эксплуатационным.

Понятие	Определение
Ускоренные испытания	<p>Лабораторные испытания на надежность, методы, режимы и условия проведения которых обеспечивают получение информации о надежности объекта <i>в более короткий срок</i>, чем при испытаниях, проводимых в реальных условиях эксплуатации объекта.</p> <p>Ускорение испытаний может достигаться, как за счет изменения <i>абсолютных значений</i> режимов и условий испытаний, так и за счет изменения <i>частоты воздействия</i> разрушающих эксплуатационных факторов.</p> <p>При испытаниях обязательно сохранение условия <i>автомодельности</i>, т.е. <i>отсутствие</i> привнесенных <i>дополнительных механизмов отказа</i>, которые могут быть вызваны данным видом нагрузки. Ускоренные испытания не должны изменять основные виды или механизмы отказов или их относительное преобладание.</p>
Коэффициент ускорения испытаний	<p>Отношение значений времени получения информации об оцениваемом показателе надежности в нормальном и ускоренном режимах.</p>
Отбраковочные испытания	<p>Испытание или набор испытаний, предназначенный для обнаружения и удаления из выборки дефектных объектов или объектов с высокой вероятностью ранних отказов.</p>
План испытаний на надежность	<p>Совокупность правил, устанавливающих объем выборки, порядок проведения испытаний, критерии их завершения и принятия решений по результатам испытаний на надежность.</p>

Рассмотрим пример ускоренных испытаний

Предположим, что нам необходимо провести испытания для подтверждения того, что данные приборы имеют интенсивность отказов не более 10^{-9} ч^{-1} (надежность современных полупроводниковых приборов и ИМС находится в пределах $10^{-7} \dots 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$). Это означает, что приборы имеют среднюю наработку до отказа 10^9 ч или 1,3 миллиона лет.

Для обеспечения приемлемой достоверности результатов испытаний необходимо произвести *достаточное* количество испытаний. В нашем случае количество опытов определяется количеством приборочасов или произведением числа приборов, поставленных на испытание на количество часов испытаний. В данном случае необходимо иметь, по крайней мере, 10^9 приборочасов с получением за время испытаний *не более одного отказа*. Возможные соотношения количества приборов и продолжительности испытаний приведены в таблице.

Число приборов	Длительность испытаний, ч(г)
1000	$10^6, (130)$
10000	$10^5, (13)$
100000	$10^4, (1,3)$

Данные таблицы свидетельствуют о том, что прямые испытания приборов для подтверждения требуемой надежности экономически невыгодны, так как требуют огромных затрат оборудования, приборов и энергоресурсов.

Одним из выходов из создавшегося положения является применение *ускоренных испытаний* (УИ) и методов прогнозирования надежности приборов. Под УИ понимаются испытания изделий либо в форсированных режимах, либо в обычных режимах эксплуатации, но в течение более короткого интервала времени. УИ рассматриваются как разновидность *физического моделирования*, позволяющего оценить надежность приборов при сжатом масштабе времени. В качестве ускоряющих *факторов*, способствующих выявлению потенциально слабых, дефектных мест изготавливаемых приборов, используются следующие *повышенные нагрузки*: тепловое воздействие, механические воздействия в виде линейных ускорений, ударов и вибрационных нагрузок, влажность, давление окружающей среды, электрическая нагрузка. В последнее время ведутся исследования обоснования применения в качестве ускоряющего фактора радиационных воздействий.

Для понимания важности УИ в таблице ниже приведено значение времени работы изделия при различных температурах, эквивалентное 40 годам функционирования прибора при температуре 60°C.

Таблица

Повышение температуры, град, °C	Время эквивалентное 40 годам (или 350400 час) функционирования, час	
	$E_a=1,0\text{эВ}$	$E_a=0,5\text{эВ}$
300	0,2	233
250	1,1	616
200	11	2000
150	200	8526
125	1200	20200
85	30000	103000

**Проблема резервирования,
избыточности, дублирования.
Примеры использования в
сложных технических системах**

Квазимостиковые структуры

Самопроверяемые дублированные структуры с реконфигурацией получили название **квазимостиковые структуры**. В основе таких структур лежит повышение **безотказности и эксплуатационной готовности** за счёт ее **декомпозицией**, при которой **каждый вычислительный канал разбивается на n функциональных субблоков**.

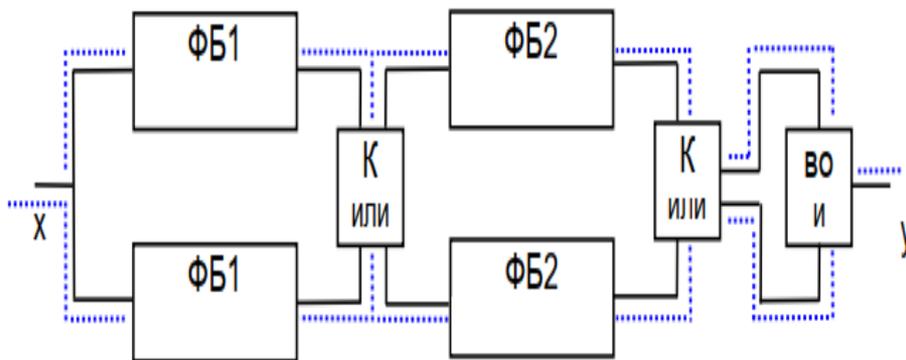


Рис.5. КМС с двумя узлами,

где ФБ – функциональная группа;

ВО - восстанавливающий орган, выполняющий функцию И;

К – контроллер, выполняющий функцию ИЛИ

Чтобы повысить надежность систем на уровне **контроллеров**, с помощью чего исключить остановку критического технологического процесса при выходе из строя некоторых элементов системы, применяют **резервирование с дублированием** основных элементов промышленного контроллера. **Электронный промышленный компьютер** или **рабочей станции** разбивается на три функционально обособленных субблока, МК1, МК2 и МК3. Каждый МК функционально обособлен и выполняет заданную функцию. Поскольку МК обоих каналов идентичны, то автоматически выполняется условие равной надёжности узлов, свойственное КМС, при котором данная структура имеет наивысшую вероятность безотказной работы

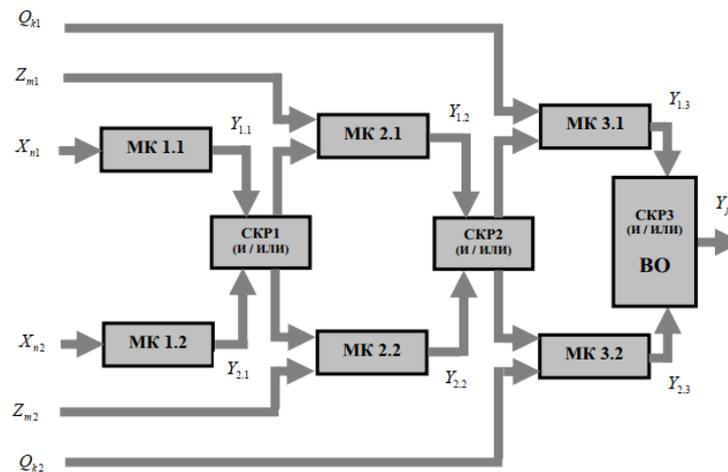


Рис. 6. Трехузловая конвейерная система на микроконтроллерах, где МК – микроконтроллер СКР - схема контроля и реконфигурации

Каждый типовой кластер К1-К6 содержит соответствующий функциональный субблок системы противоаварийной автоматики со своей самопроверяемой схемой внутреннего контроля, схему реконфигурации, системный монитор и источник бесперебойного питания системного монитора. Режимный кластер К7 выполняет наиболее ответственные операции по непосредственному управлению исполнительными объектами, он имеет ограниченный доступ обслуживающего персонала ГЭС и содержит блок безопасных устройств сопряжения, логический коммутатор и контрольное табло, предназначенное для оперативного контроля за состоянием системы в целом.

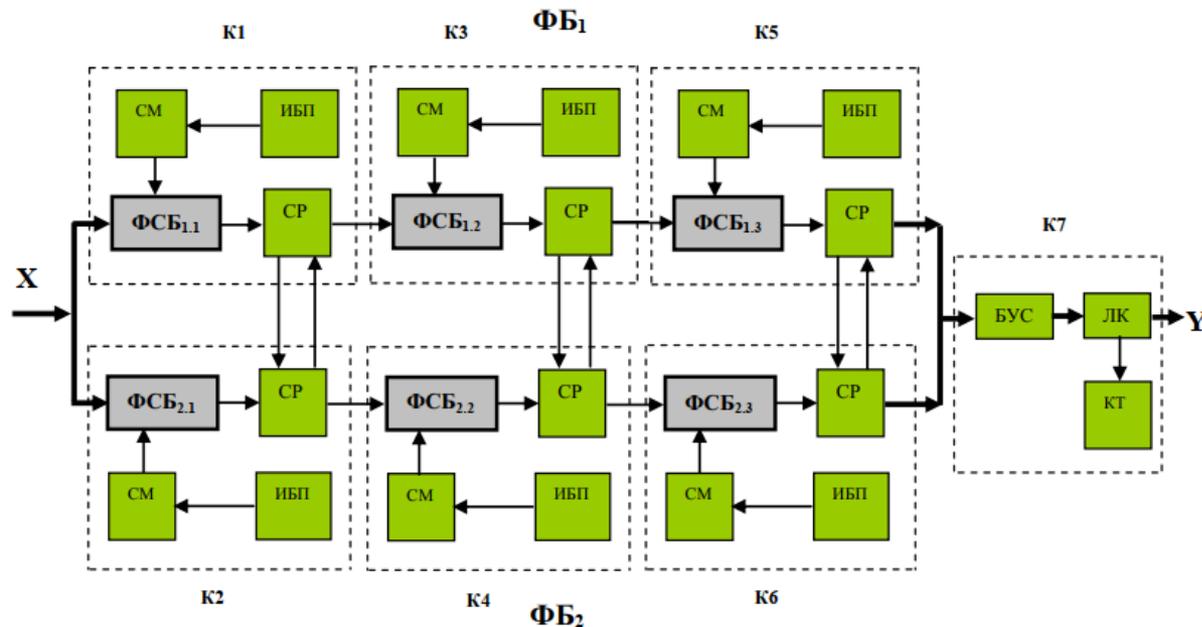


Рис. 7. КМС декомпонированная на 7 кластеров.

Использование супервизоров конфигураций для резервирования избыточных систем

Данный подход к управлению избыточностью предусматривает наличие **самодостаточных программных объектов (модулей)** по числу заранее просчитанных конфигураций. Каждый такой объект называется **супервизором конфигурации** и функционирует в составе **системы управления избыточностью**, периодически осуществляя мониторинг готовности включенных в конфигурацию компонентов, и участвуя в арбитраже между всеми супервизорами конфигураций с целью выбора доминирующего.

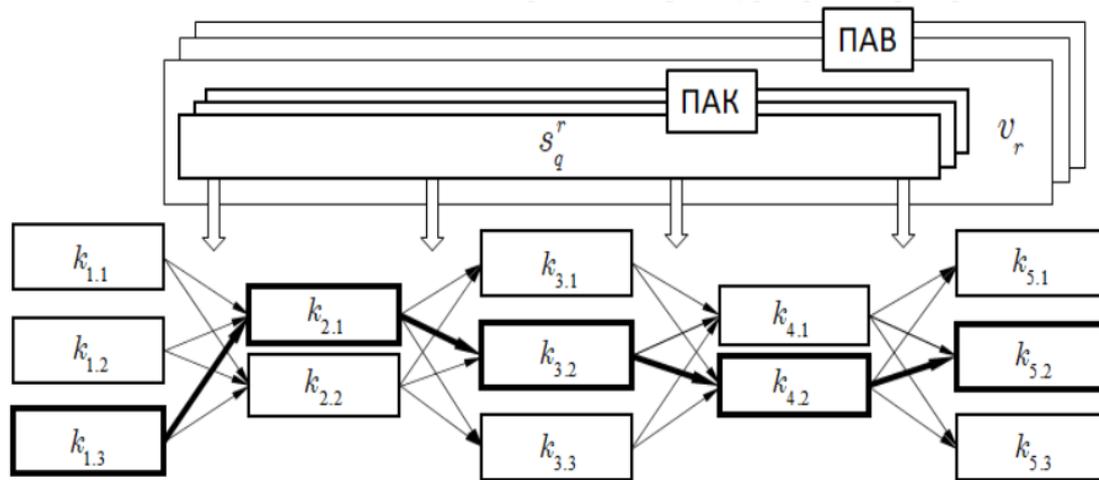


Рис. 8. Схема резервирования с использованием супервизоров конфигураций

Резервирование цифровых сетей

RSTP — быстрый протокол разворачивающегося дерева, который сводит любую топологию к древовидной. Суть протокола в том, что один из **коммутаторов** становится центром топологии (**корневым коммутатором**), пропускающим через себя наибольшее количество данных. Остальные же коммутаторы определяют наиболее быстрый путь до корневого, после чего оставшиеся каналы блокируются и становятся резервными.

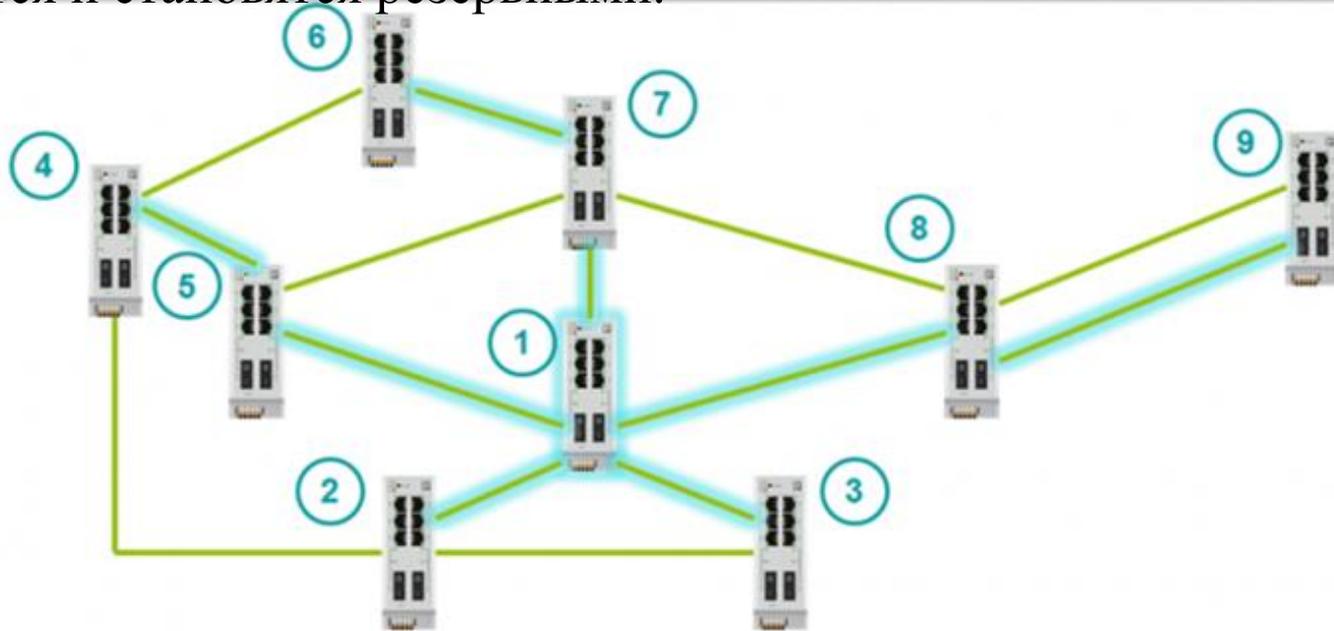


Рис. 9. Пример протокола RSTP,
где 1 – это корневой элемент, а выделенные
линии – основные каналы

Кольцевая структура

Реализацию протокола ERR можно рассмотреть на примере резервированной системы, в которой используются удаленные полевые контроллеры RFC 460R PN 3TX. Такая система может достигать до 80 км между удаленными полевыми контроллерами, соединёнными оптоволоконным кабелем и иметь максимальное время восстановления до 15 мс, а количество используемых в структуре контроллеров может достигать 134.

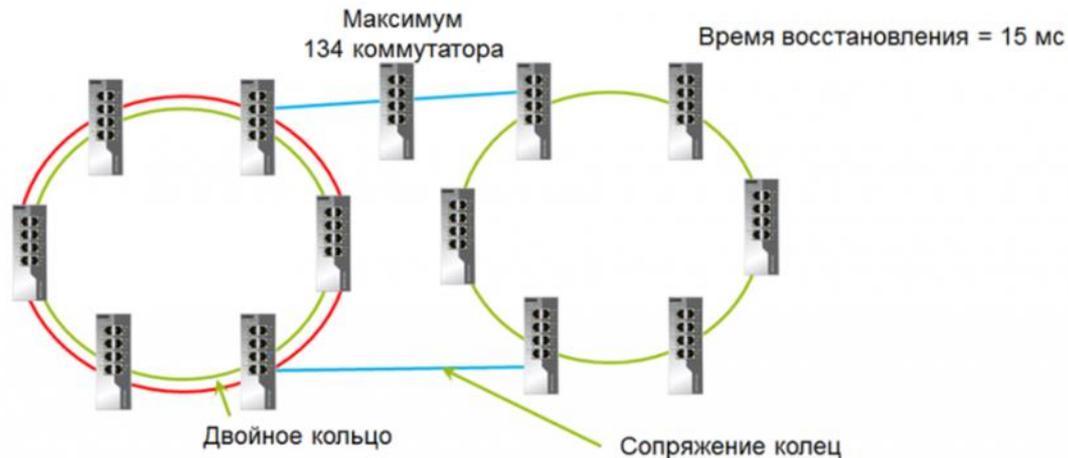
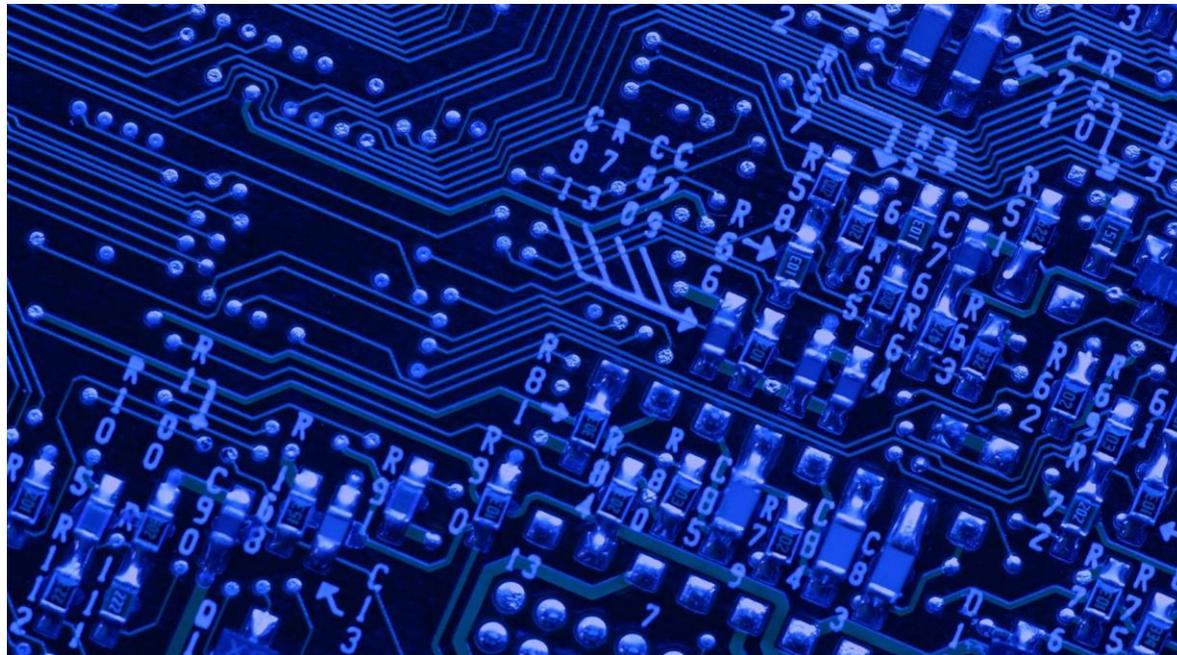


Рис. 10. Протокол ERR.

Новые проблемы исследования надежности наноэлектроники

Разработка современных *серверных систем*, использующих новейшие достижения **наноэлектроники**, которые отличаются значительным увеличением *степени интеграции на четыре порядка*, а возрастающая ответственность выполняемых ими функций выдвигает на первое место проблему *расчета надежности*, которая потребовала разработки новой модели расчета надежности технических средств (ТС) серверных нанопроцессорных систем (СНПС).



Сегодня при развитии наноэлектроники, когда мы имеем серверные нанопроцессорные системы, содержащие

- десятки (10^1) нанопроцессоров
- миллиард транзисторов (10^9),

которые работают десятки тысяч часов (10^4), то есть **сложность таких систем составляет 10^{14} элементочасов**, что приводит к изменению подходов в расчетах и обеспечении надежности СНПС с учетом *алгоритмической и архитектурной избыточности*.

Сегодня нанопроцессоры (НП) содержат 2, 4, 8, 16 ядер в одном корпусе, а скоро будут содержать 128 – 256 ядер в одном корпусе (это сложная сетевая структура), выполненных по сетевой, кольцевой или многокорневой древоструктуре со сложными протоколами обмена данных, использующие **структурную и информационную избыточность**.

Сегодня НП используют различные архитектуры КЭШ-памяти первого, второго и третьего уровней для каждого ядра, что позволяет повысить *быстродействие* и *безотказность* нанопроцессорных систем, за счет использования **временной и информационной избыточности**.

Тридцать лет назад при расчетах надежности стали учитывать микропроцессорных систем (МПС) *режимную и структурную избыточность*, двадцать лет назад мы стали учитывать при расчетах надежности МПС *временную и функциональную избыточность*, десять лет назад мы стали учитывать при расчетах надежности МПС *информационную и программную избыточность*.

Сейчас при переходе к наноэлектронике и в будущем при переходе к квантэлектронике мы должны учитывать при расчетах живучести *алгоритмическую и архитектурную избыточность*, учитывающую протоколы обмена и управления информацией, и может быть и *брейнпьютерную (мозговую) избыточность*, учитывающую многокорневые деревья анализа и обработки данных с инверсией на различных рангах.

Значительное *повышение* надежности может быть получено за счет использования в СНПС сетевой многоядерной структуры кристалла, древообразной многокорневой многокэшовой структуры памяти, многоконвейерной структуры с различными уровнями (ступенями) конвейеров, использованием микротехнологий, обеспечивающих плотность упаковки операций в одном такте для большой разрядности, которые позволяют перейти *от интеграции схем к интеграции систем* и удовлетворить все возрастающие требования заказчиков к быстродействию, точности и количеству решаемых задач при разработке *современных комплексов обработки информации*, основой которых являются СНПС.

В процессе проектирования и производства таких систем все шире начинают использоваться технологии *цифрового моделирования и проектирования*.

Сегодня под «*цифровым производством*» понимается, прежде всего, использование технологий цифрового моделирования и проектирования как самих продуктов и изделий, так и производственных процессов на всем протяжении жизненного цикла. По сути, речь идет о создании *цифровых двойников* продукта и процессов его производства.

В процессе *цифрового моделирования* – развитие получает концепция цифрового двойника, то есть изготовление изделия в виртуальной модели, включающей в себя оборудование, производственный процесс и персонал предприятия.

Цифровые двойники оборудования отображают реальное состояние оборудования, непрерывно обновляются с помощью данных с датчиков и позволяют *прогнозировать его поломки и отказы*.

В целом *выгоды* от использования концепции цифрового производства состоят, в первую очередь, в *снижении количества ошибок* в реальном производстве за счет их *обнаружения и устранения* на ранних этапах подготовки в виртуальной среде. В свою очередь, сокращение ошибок в реальном производственном процессе благоприятно сказывается на затратах на производство (стоимость устранения реальных ошибок всегда выше, чем виртуальных), а также на времени подготовки производства, поскольку *ошибки в технологии обнаруживаются и устраняются на этапе проектирования изделия*, и, соответственно, запуск производства осуществляется в более короткие сроки. Таким образом, организация цифрового производства помогает сэкономить время и деньги, затрачиваемые на подготовку реального производства, и повысить его эксплуатационную надежность.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!