

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Томский политехнический университет»

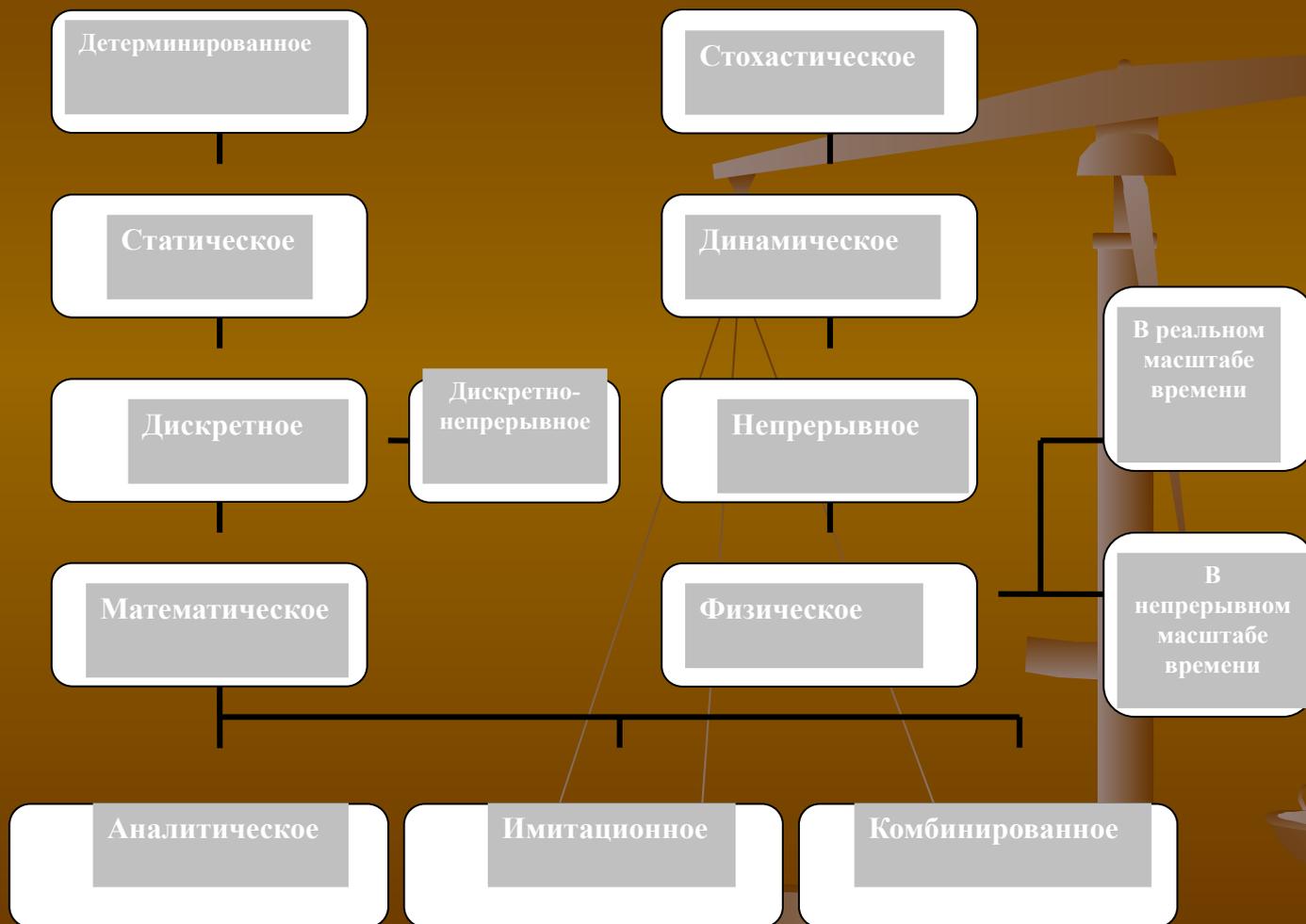
А.В. Аристов

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

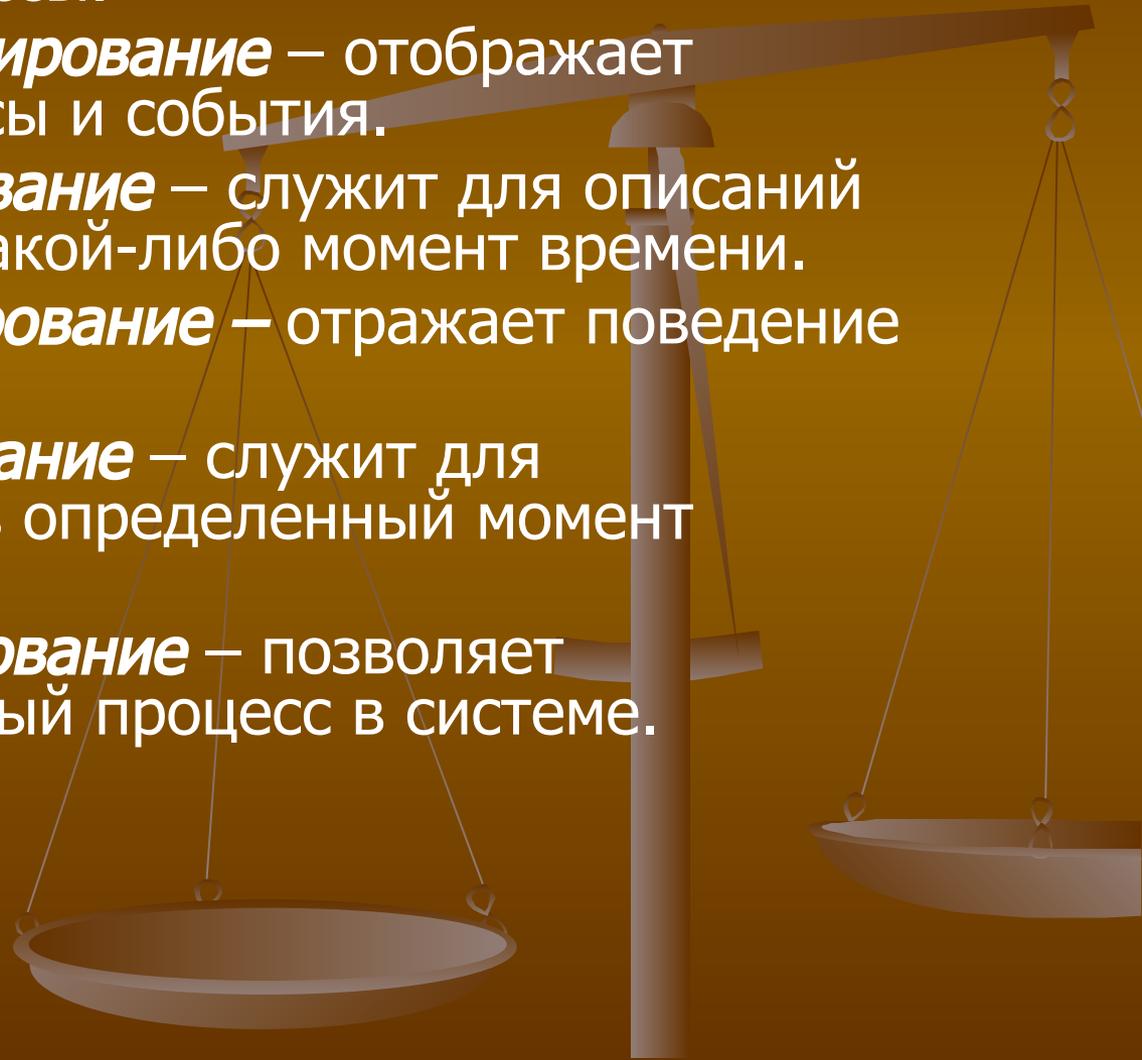
Томск 2010



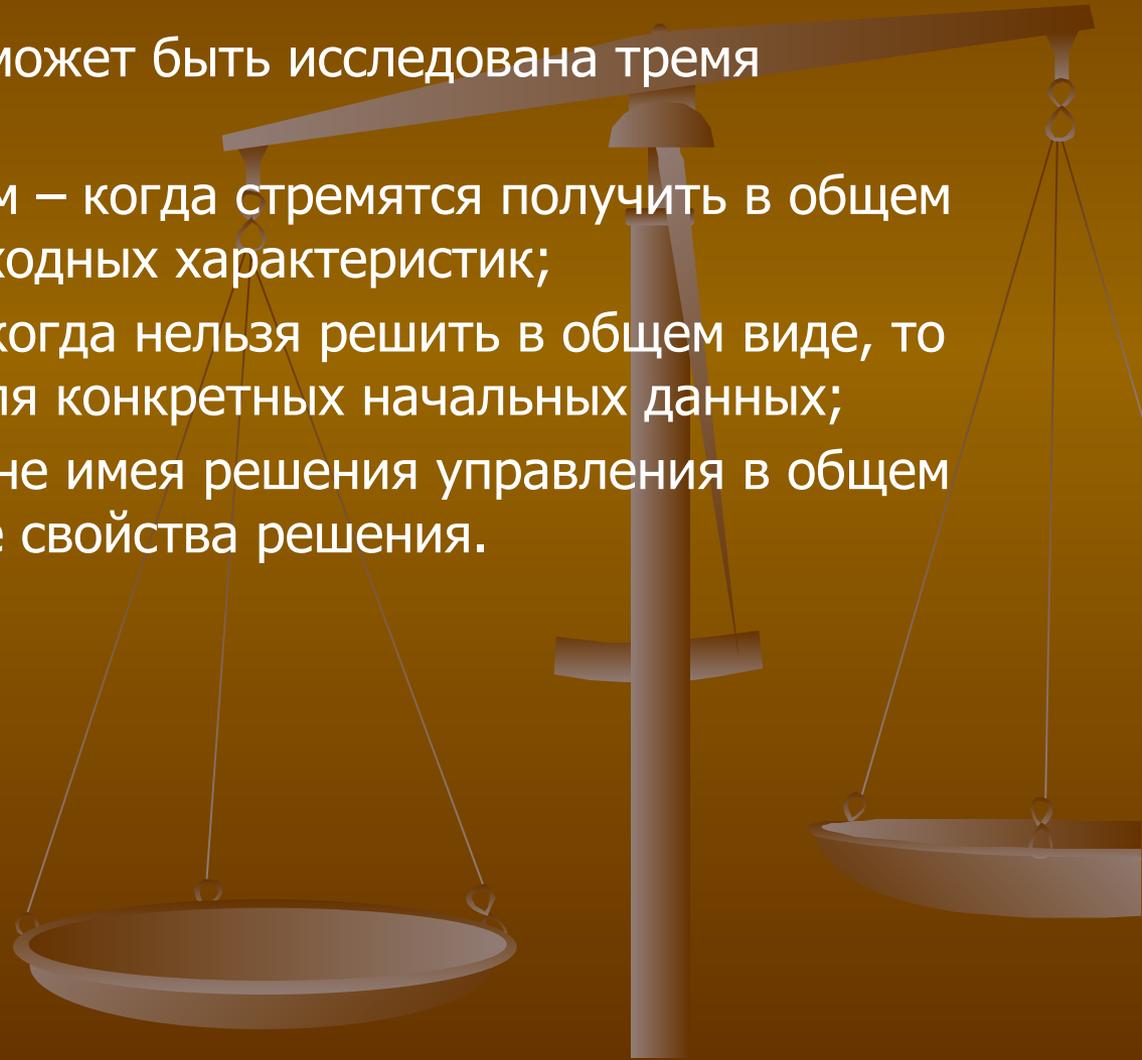
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС



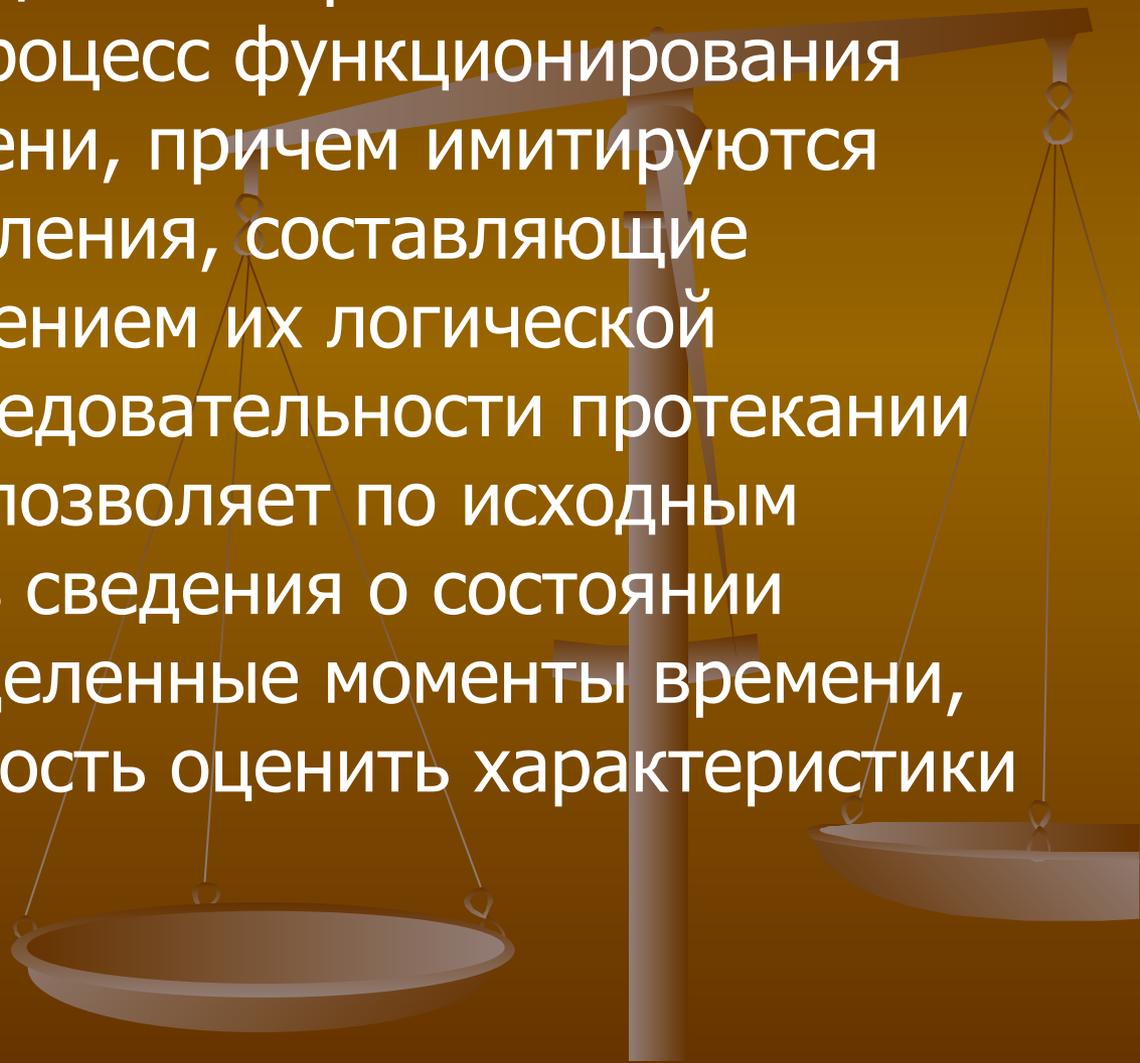
- **Детерминированное моделирование** – отображает детерминированные процессы, т.е. такие процессы в которых отсутствуют всякие случайные величины и даже случайные процессы.
- **Стохастическое моделирование** – отображает вероятностные процессы и события.
- **Статическое моделирование** – служит для описаний поведения объекта в какой-либо момент времени.
- **Динамическое моделирование** – отражает поведение объекта во времени.
- **Дискретное моделирование** – служит для отображения объекта в определенный момент времени.
- **Непрерывное моделирование** – позволяет отображать непрерывный процесс в системе.



- **Аналитическое моделирование** – математическая формализация, изменения свойств объекта во времени.
- Аналитическая модель может быть исследована тремя способами:
 - аналитическим способом – когда стремятся получить в общем виде зависимость от исходных характеристик;
 - численным способом – когда нельзя решить в общем виде, то получают результаты для конкретных начальных данных;
 - качественный способ – не имея решения управления в общем виде, ищутся некоторые свойства решения.



- При **имитационном моделировании** реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состоянии процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы.

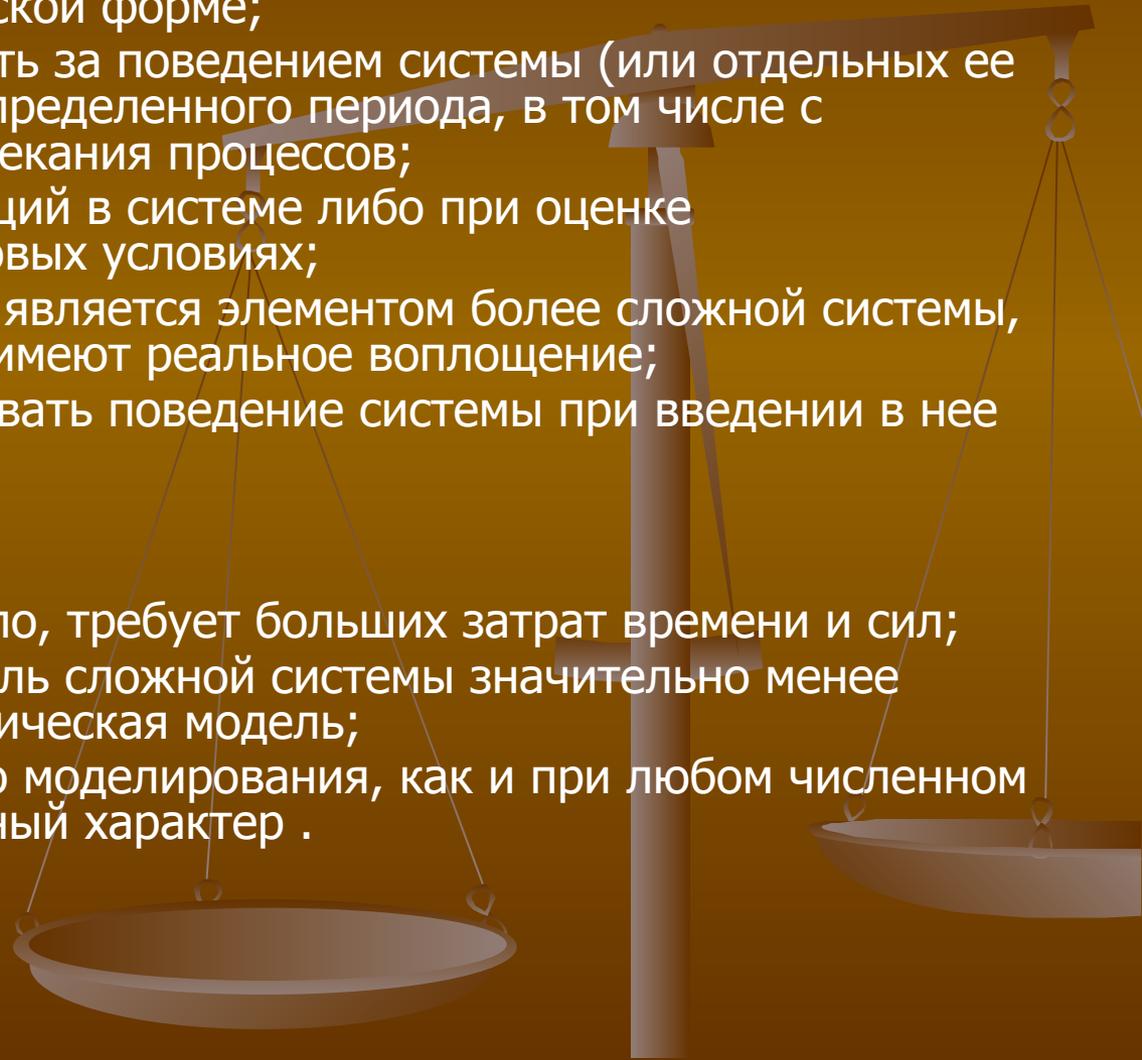


ДОСТОИНСТВА:

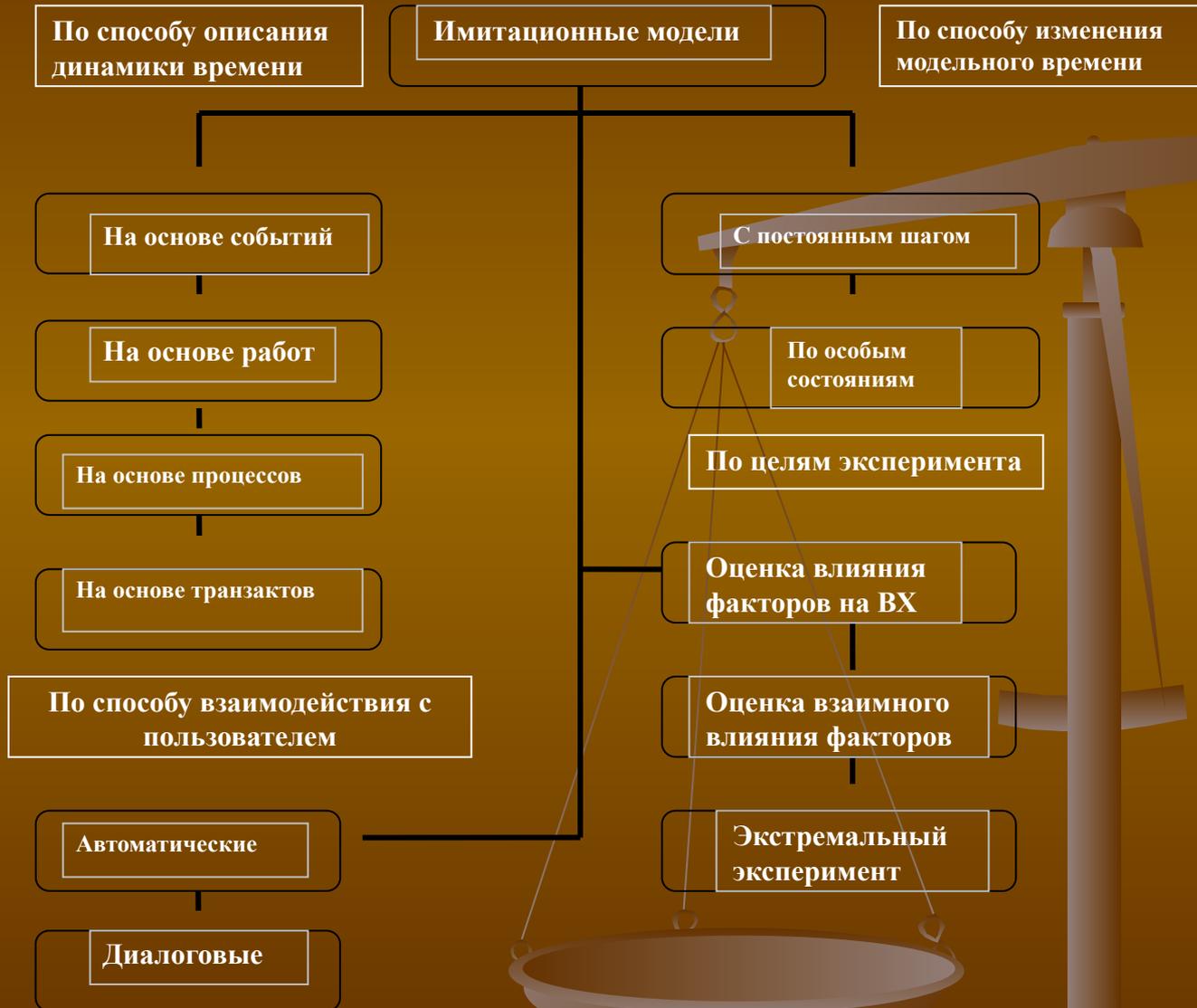
- если не существует законченной постановки задачи на исследование и идет процесс познания объекта моделирования;
- если характер протекающих в системе процессов не позволяет описать эти процессы в аналитической форме;
- если необходимо наблюдать за поведением системы (или отдельных ее компонентов) в течение определенного периода, в том числе с изменением скорости протекания процессов;
- при изучении новых ситуаций в системе либо при оценке функционирования ее в новых условиях;
- если исследуемая система является элементом более сложной системы, другие элементы которой имеют реальное воплощение;
- когда необходимо исследовать поведение системы при введении в нее новых элементов.

НЕДОСТАТКИ:

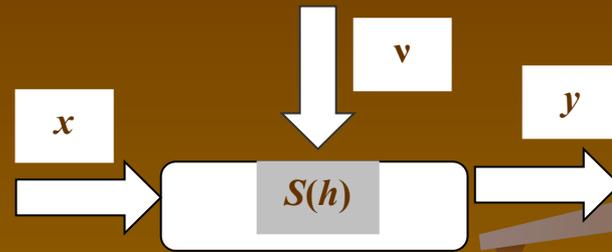
- разработка ИМ, как правило, требует больших затрат времени и сил;
- любая имитационная модель сложной системы значительно менее «объективна», чем аналитическая модель;
- результаты имитационного моделирования, как и при любом численном методе, всегда носят частный характер .



КЛАССИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ЭМС



ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ



- Множество входных параметров
- Множество внутренних параметров
- Внешнее воздействия
- Множество выходных параметров

$$x_i \in X, i = \overline{1, n_x}$$

$$h_j \in H, j = \overline{1, n_h}$$

$$v_k \in V, k = \overline{1, n_v}$$

$$y_m \in Y, m = \overline{1, n_m}$$

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС

$$\vec{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_{nx}(t)\}$$

$$\vec{h}(t) = \{h_1(t), h_2(t), \dots, h_{nh}(t)\}$$

$$\vec{v}(t) = \{v_1(t), v_2(t), \dots, v_{nv}(t)\}$$

$$\vec{y}(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_{ny}(t)\}$$

$$\vec{y}(t) = F_s(\vec{x}, \vec{h}, \vec{v}, t)$$

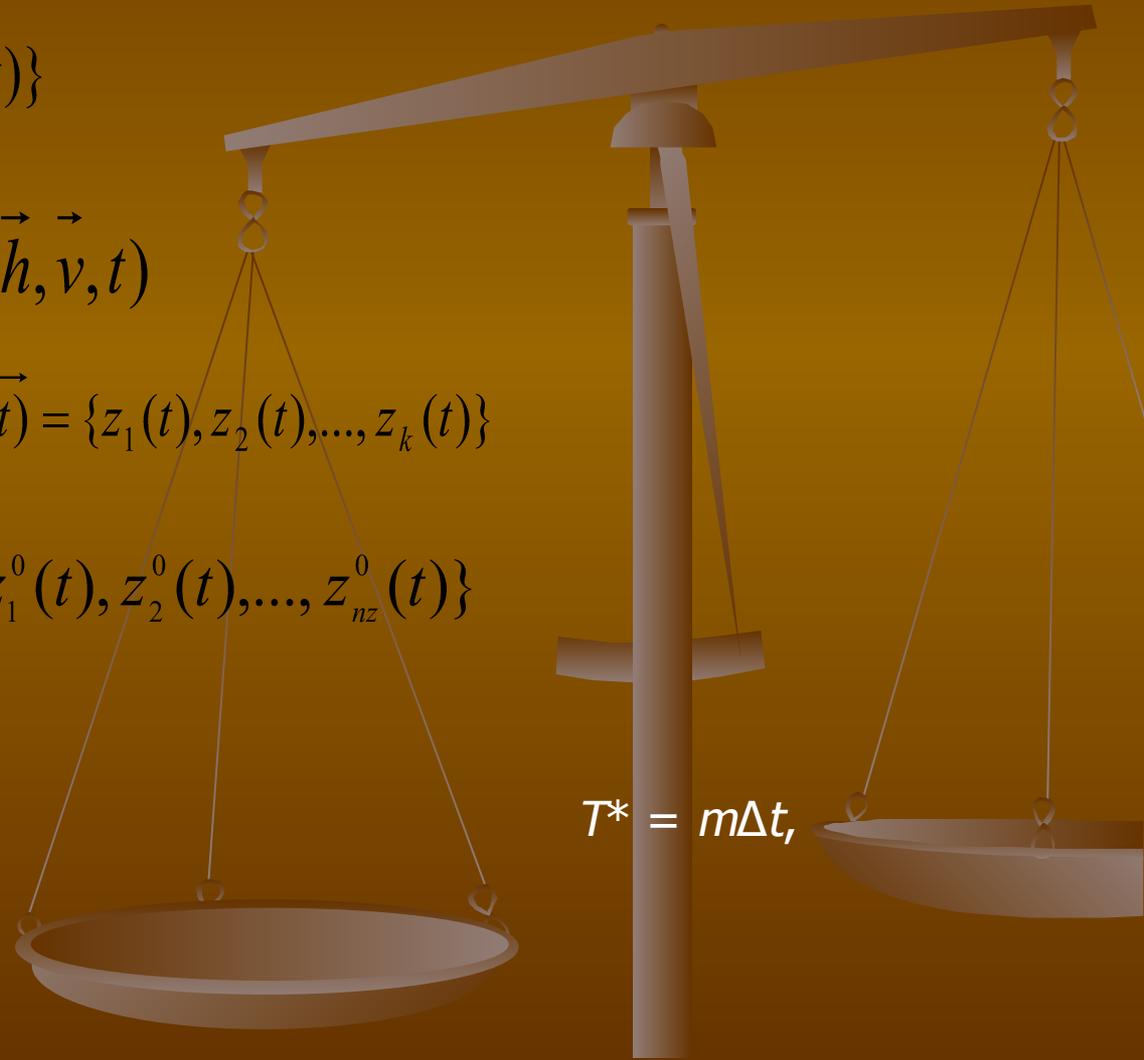
$$z_k \in Z, k = 1, n_z$$

$$\vec{z}_m(t) = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_k(t)\}$$

$$t_0 \leq t \leq T^*$$

$$\vec{z}^0(t) = \{z_1^0(t), z_2^0(t), \dots, z_{nz}^0(t)\}$$

$$\begin{cases} \vec{z}(t) = \Phi(\vec{z}^0, \vec{x}, \vec{v}, \vec{h}, t) \\ \vec{y}(t) = F(\vec{z}, t) \end{cases}$$



$$T^* = m\Delta t,$$

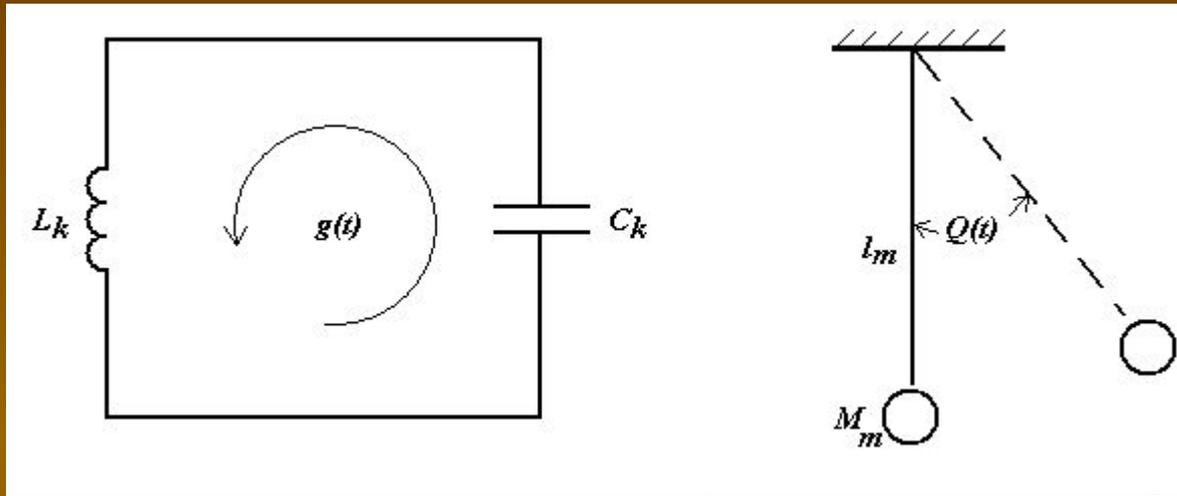
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС

Процессы функционирования системы	Типовая математическая схема	Обозначение
Непрерывно-детерминированный подход	стандартные ДУ	<i>D</i> - схема
Дискретно-детерминированный подход	конечные автоматы	<i>F</i> - схема
Дискретно-стохастический подход	вероятностные автоматы	<i>P</i> - схема
Непрерывно-стохастический подход	система массового обслуживания	<i>Q</i> - схема
Обобщенный (универсальный)	агрегативная система	<i>A</i> - схема

P, Q - схемы относятся к *P-net, CP-net*.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС

Непрерывно-детерминированные модели D -схемы (dinamic)



$$L_k \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + \frac{q(t)}{C_k} = 0$$

$$M_M l_M^2 \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} + m_M g l_M \theta(t) = 0$$

$$h_2 = L_k = M_M l_M^2$$

$$h_1 = 0$$

$$h_0 = \frac{1}{C_k} = M_M g l_M$$

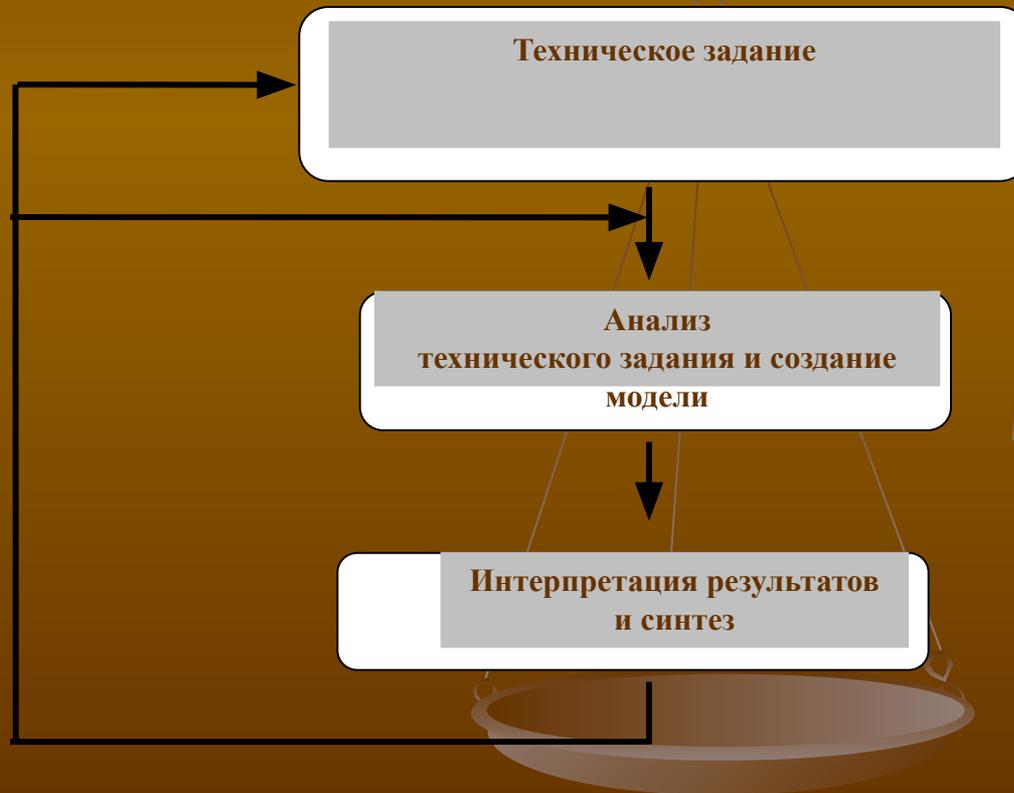
$$h_2 \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + h_1 \frac{dz(t)}{dt} + h_0 z(t) = 0$$

$$h_2 \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + h_1 \frac{dz(t)}{dt} + h_0 z(t) = x(t)$$

Формализация и алгоритмизация процесса функционирования сложных систем

Основные требования, предъявляемые к модели

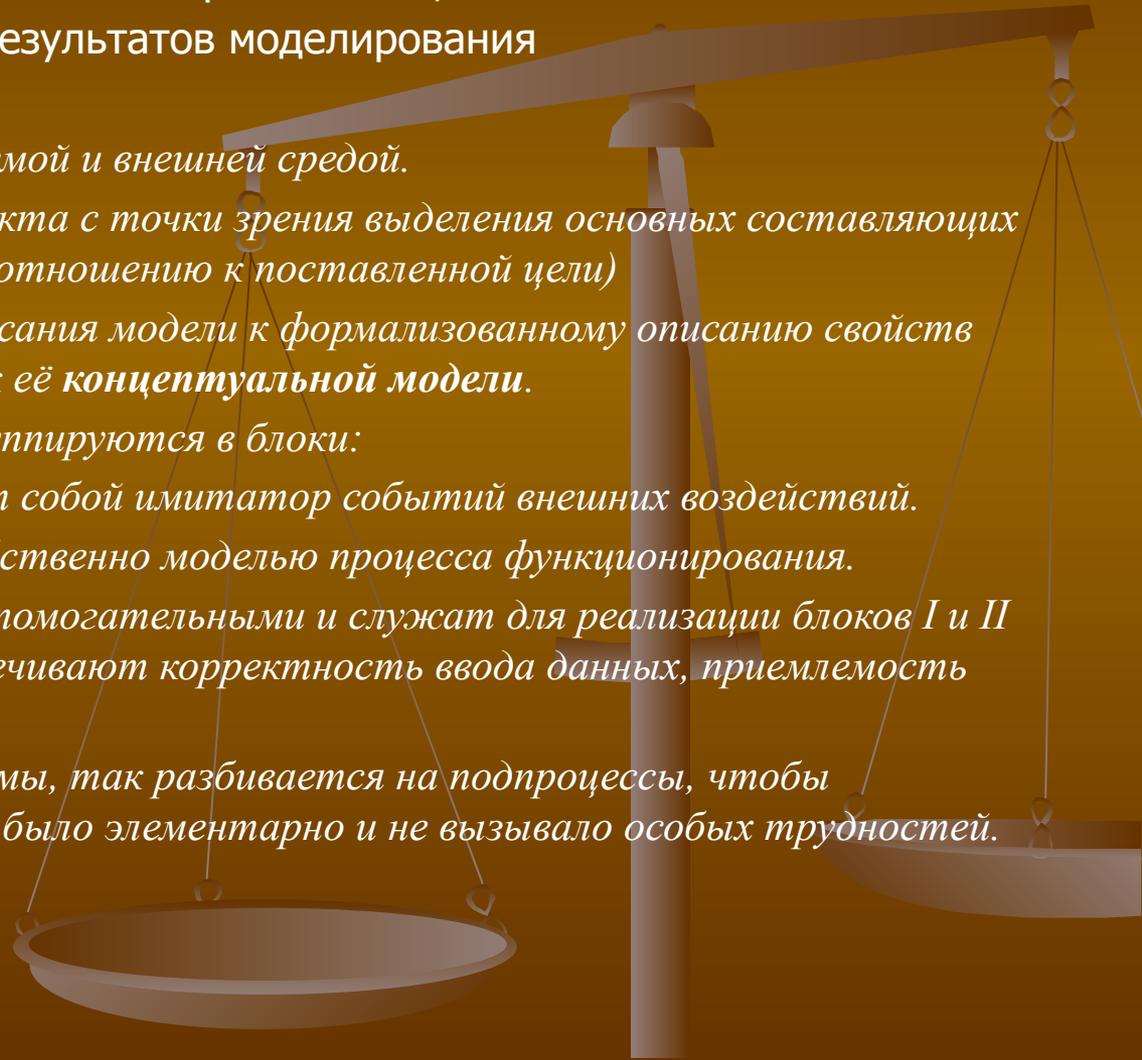
- *Полнота модели*
- *Гибкость модели*
- *Компьютерная реализация модели*



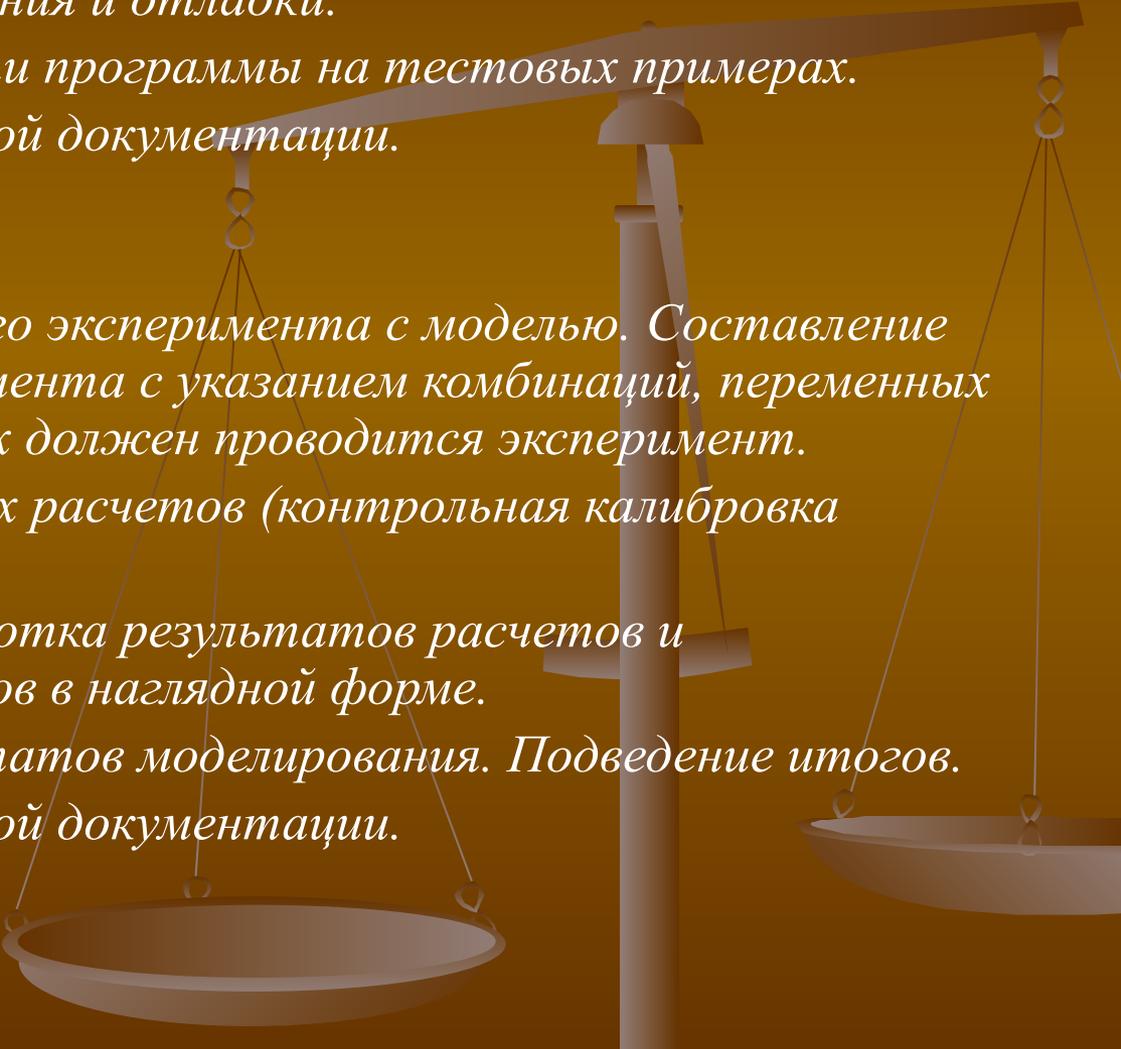
Основные этапы моделирования больших систем

- Построение концептуальной (описательной) модели системы и её формализация;
- Алгоритмизация модели и её машинная реализация;
- Получение и интерпретация результатов моделирования

1. *Проведение границы между системой и внешней средой.*
2. *Исследование моделируемого объекта с точки зрения выделения основных составляющих функционирования системы (по отношению к поставленной цели)*
3. *Переход от содержательного описания модели к формализованному описанию свойств функционирования модели, т.е. к её **концептуальной модели**.*
4. *Оставшиеся элементы модели группируются в блоки:*
 - *Блоки I-ой группы представляют собой имитатор событий внешних воздействий.*
 - *Блоки II-ой группы являются собственно моделью процесса функционирования.*
 - *Блоки III-ой группы являются вспомогательными и служат для реализации блоков I и II группы. Так же эти блоки обеспечивают корректность ввода данных, приемлемость результатов и т.д.*
5. *Процесс функционирования системы, так разбивается на подпроцессы, чтобы построение модели подпроцесса было элементарно и не вызывало особых трудностей.*



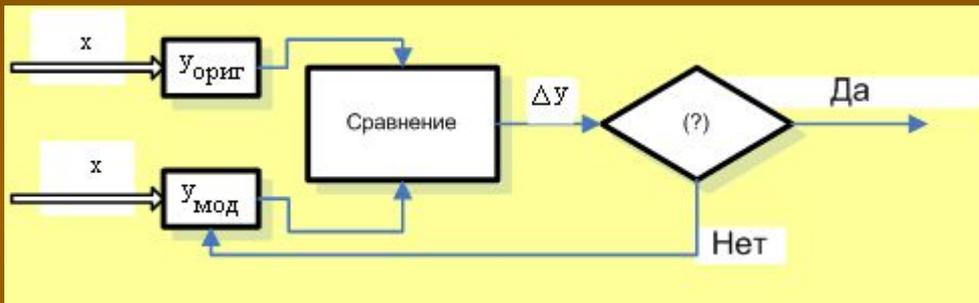
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС

- 1. Разработка схемы моделирующего алгоритма.
 - 2. Разработка схемы программы.
 - 3. Выбор технических средств для реализации программной модели.
 - 4. Процесс программирования и отладки.
 - 5. Проверка достоверности программы на тестовых примерах.
 - 6. Составление технической документации.
-
- 1. Планирование машинного эксперимента с моделью. Составление плана проведения эксперимента с указанием комбинаций, переменных и параметров для которых должен проводиться эксперимент.
 - 2. Проведение собственных расчетов (контрольная калибровка модели).
 - 3. Статистическая обработка результатов расчетов и представление результатов в наглядной форме.
 - 4. Интерпретация результатов моделирования. Подведение итогов.
 - 5. Составление технической документации.
- 

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС

Три основных класса ошибок:

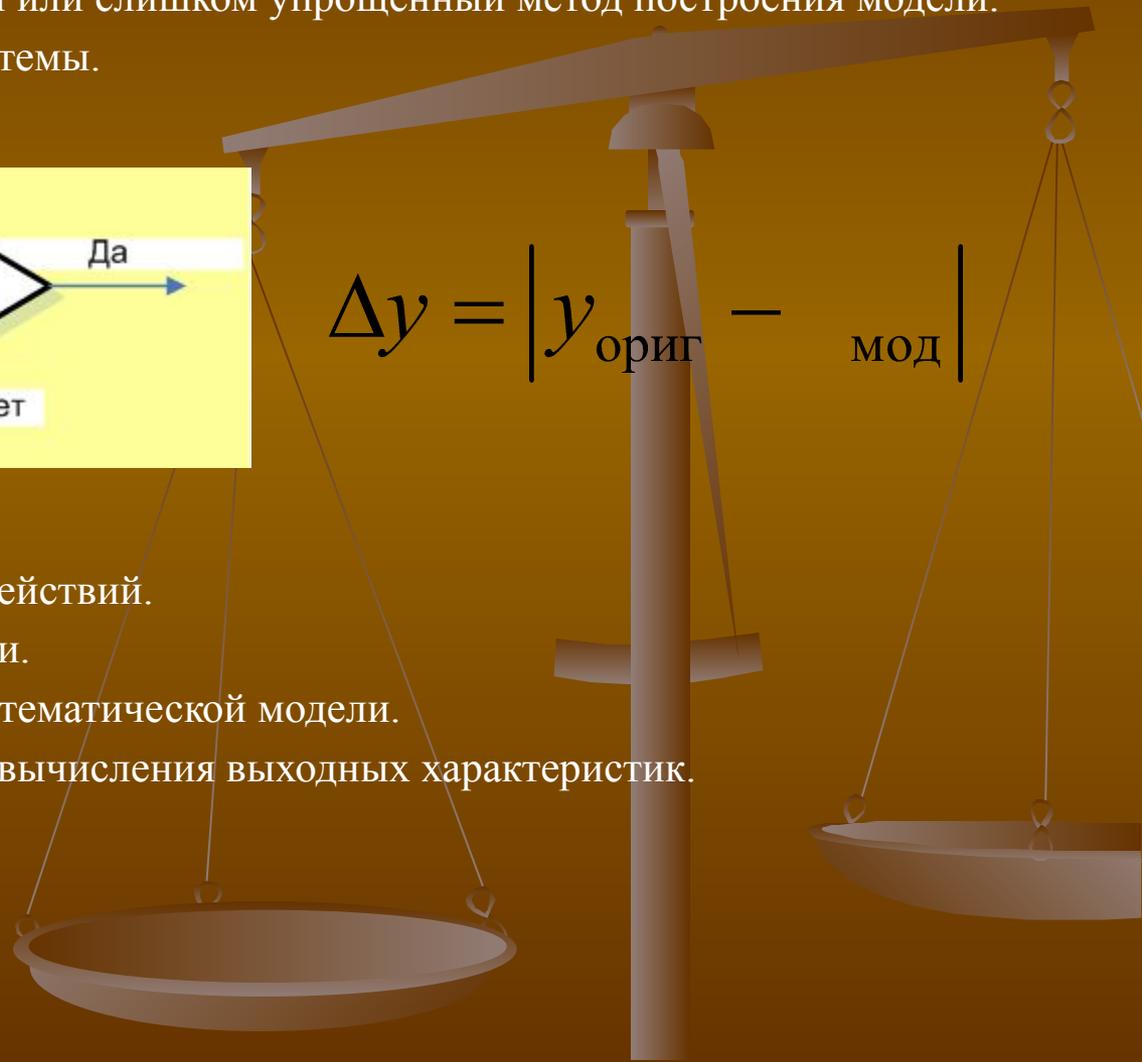
- Ошибки формализации. Как правило возникают, когда модель недостаточно подробно определена.
- Ошибки решения. Некорректный или слишком упрощенный метод построения модели.
- Ошибки задания параметров системы.



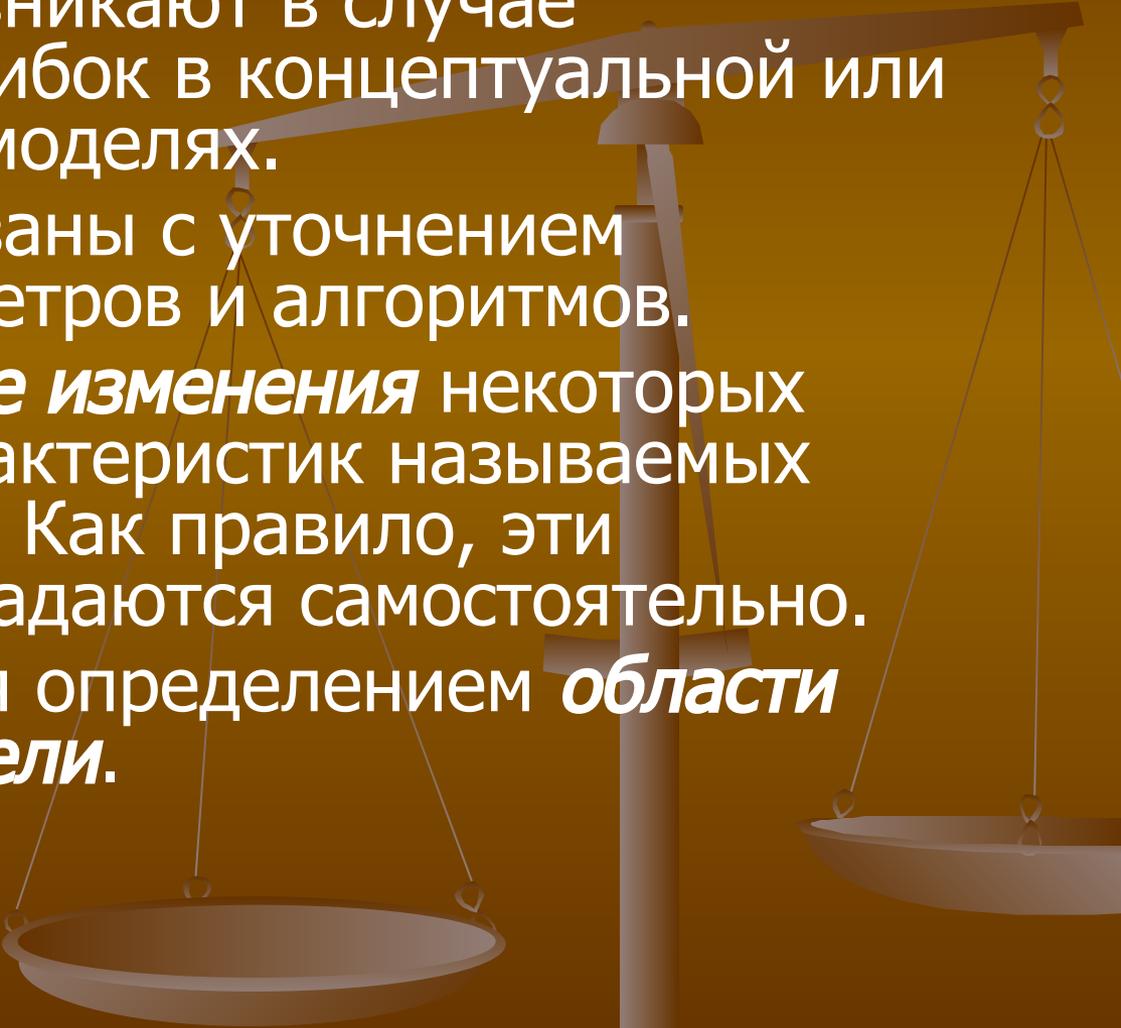
Виды проверок.

- Проверка моделей элементов.
- Проверка моделей внешних воздействий.
- Проверка концептуальной модели.
- Проверка формализованной и математической модели.
- Проверка способов измерения и вычисления выходных характеристик.
- Проверка программной модели.

$$\Delta y = \left| y_{\text{ориг}} - y_{\text{мод}} \right|$$



ТИПЫ ИЗМЕНЕНИЙ

- **Глобальные** – возникают в случае методических ошибок в концептуальной или математической моделях.
 - **Локальные** – связаны с уточнением некоторых параметров и алгоритмов.
 - **Параметрические изменения** некоторых специальных характеристик называемых **калибровочными**. Как правило, эти характеристики задаются самостоятельно.
 - Этап завершается определением **области пригодности модели**.
- 

Запас чисел последовательности ограничен её периодом

Способ Требуются затраты машинного времени	Достоинства	Недостатки
Аппаратный	<ul style="list-style-type: none">Запас чисел неограниченРасходуется мало операцийНе занимает место в оперативной памяти	<ul style="list-style-type: none">Требуеться периодическая проверка на случайностьНельзя воспроизводить последовательностиИспользуются специальные устройства. Надо стабилизировать
Табличный	<ul style="list-style-type: none">Требуеться однократная проверкаМожно воспроизводить последовательности	<ul style="list-style-type: none">Запас чисел ограниченЗанимает место в оперативной памяти и требуеться время на обращение к памяти
Алгоритмический	<ul style="list-style-type: none">Однократная проверкаМожно многократно воспроизводить последовательности чиселОтносительно малое место в оперативной памятиНе используются внешние устройства	<ul style="list-style-type: none">Запас чисел последовательности ограничен её периодомТребуються затраты машинного времени

Основные анализируемые характеристики генерируемых датчиком последовательностей:

- равномерность;
- стохастичность (случайность);
- независимость.

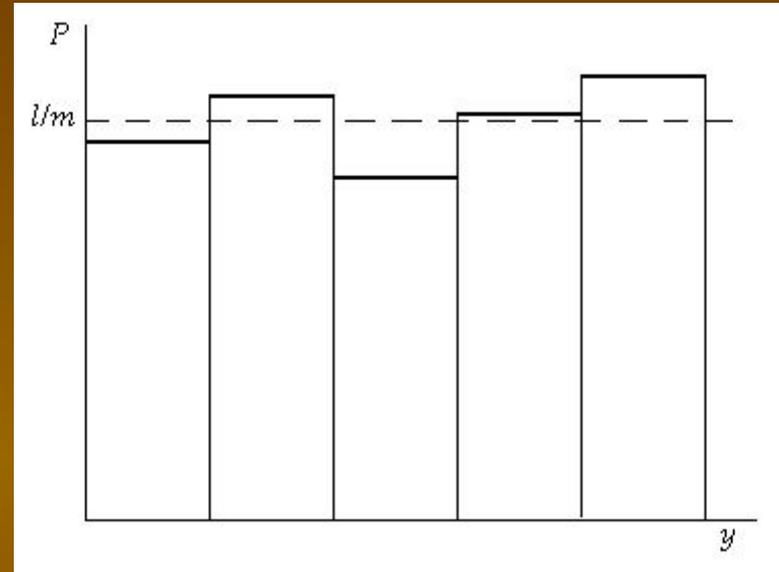
- X_j

$$N_j = N \cdot C_{jl} \cdot P_{i(l)}$$

- Вводят в рассмотрение дополнительную последовательность Y , в которой ,

$$Y = x_{1+t}$$

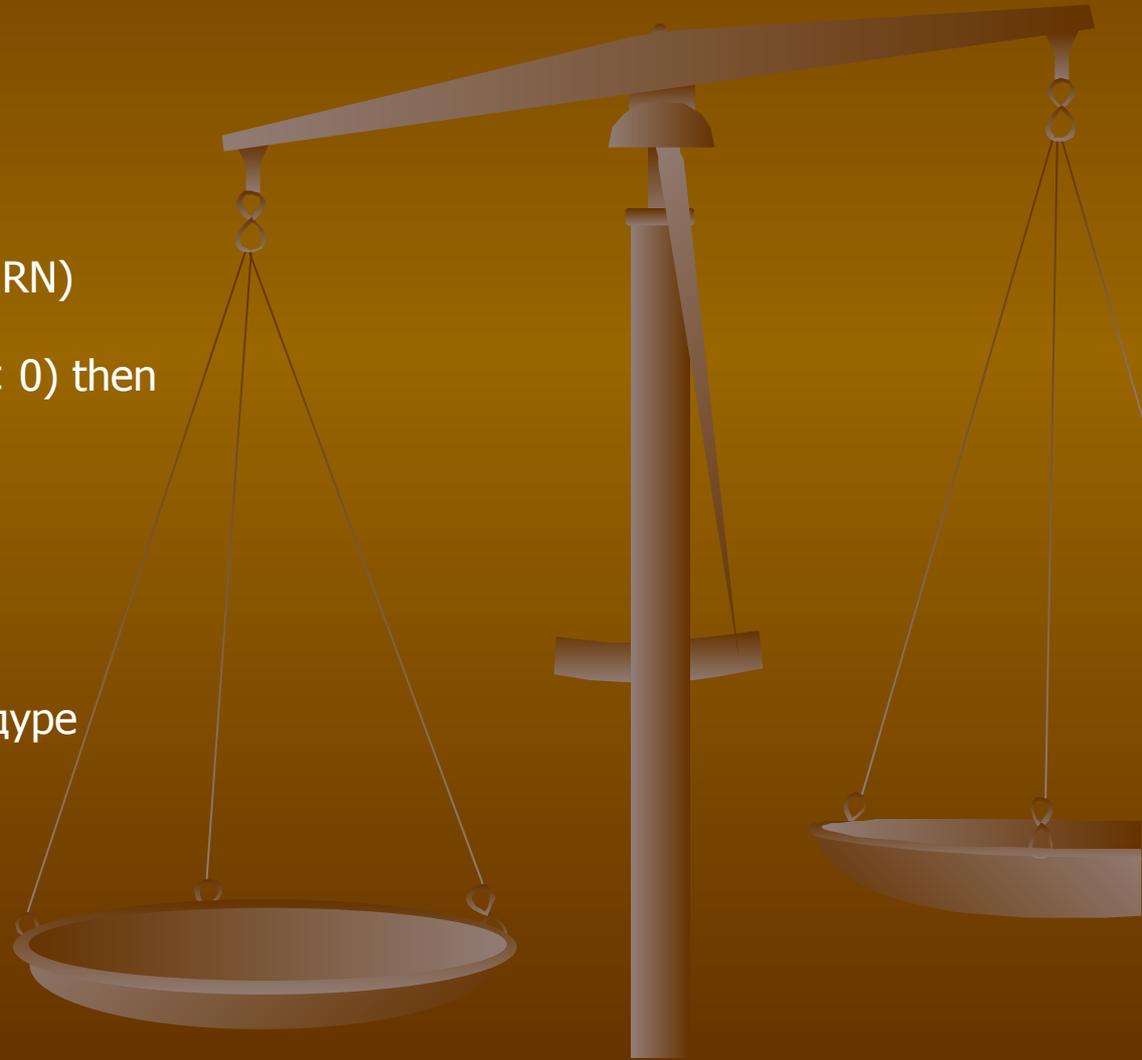
- где t – величина сдвига последовательности Y относительно исходной последовательности x .
- Вычисляют коэффициент корреляции случайных величин x и Y , для чего используются специальные расчетные соотношения.



$$y_n = Ent(an + b)$$

$$g_{n+1} = g_n k + c \bmod m$$

- SUBROUTINE RANDUM(IX, IY, RN)
- IY = IX * 1220703125
- IF (IY) 3,4,4 // if (IY < 0) then
- 3IY = IY + 2147483647 + 1
- 4RN = IY
- RN = RN * 0.4656613E-9
- IX = IY
- RETURN
- END
- // обращение к данной процедуре
- CALL RANDUM(IX, IY, YFL)



$$\frac{x - a}{b - a} = R$$

$$x = a + (b - a)R$$

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(x)dx = R$$

$$1 - e^{-\lambda x} = R$$

$$x = \left(-\frac{1}{\lambda}\right) \ln(1 - R)$$

Распределение Пуассона

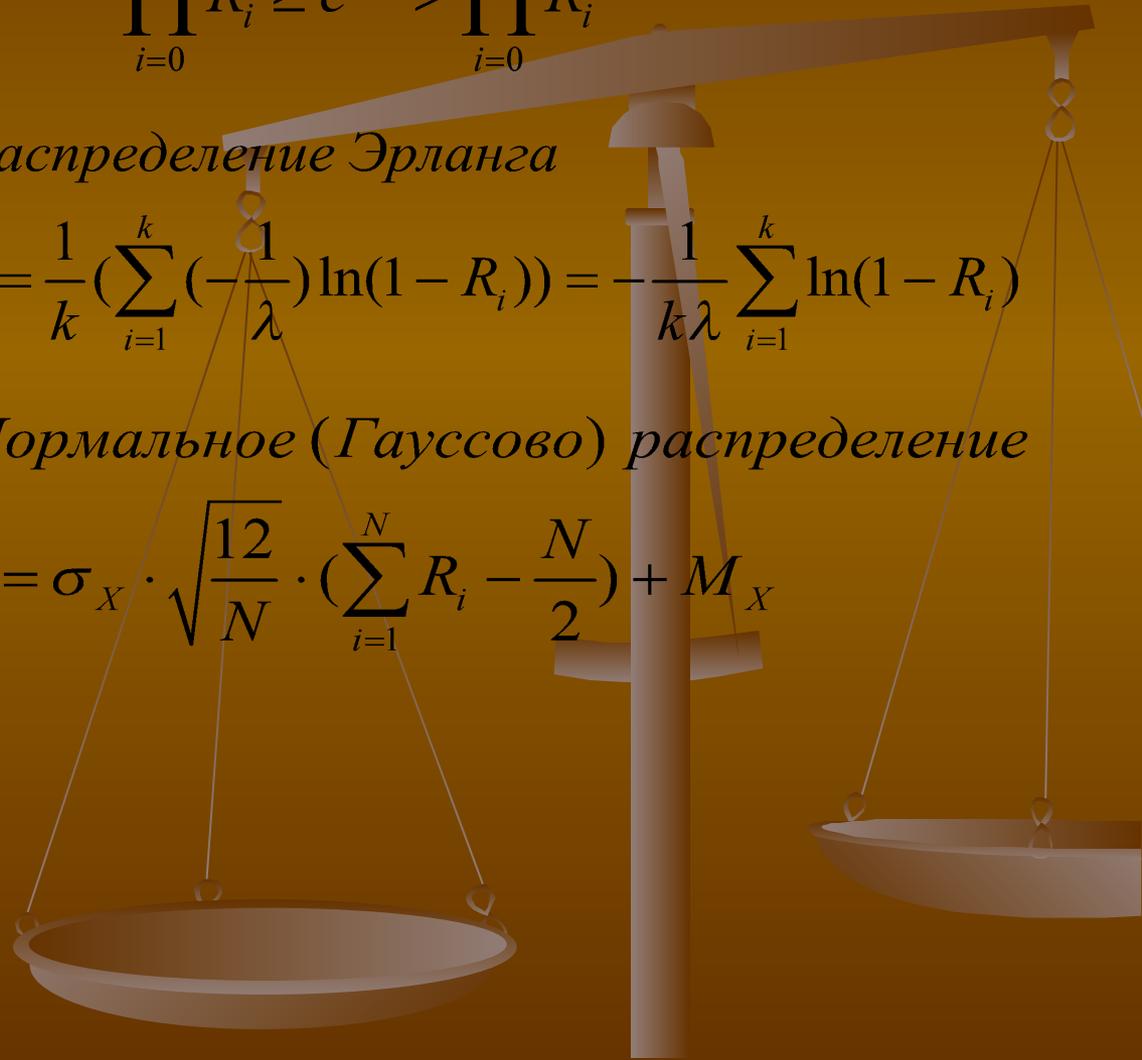
$$\prod_{i=0}^x R_i \geq e^{-\lambda} > \prod_{i=0}^{x+1} R_i$$

Распределение Эрланга

$$x = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k \left(-\frac{1}{\lambda}\right) \ln(1 - R_i) \right) = -\frac{1}{k\lambda} \sum_{i=1}^k \ln(1 - R_i)$$

Нормальное (Гауссово) распределение

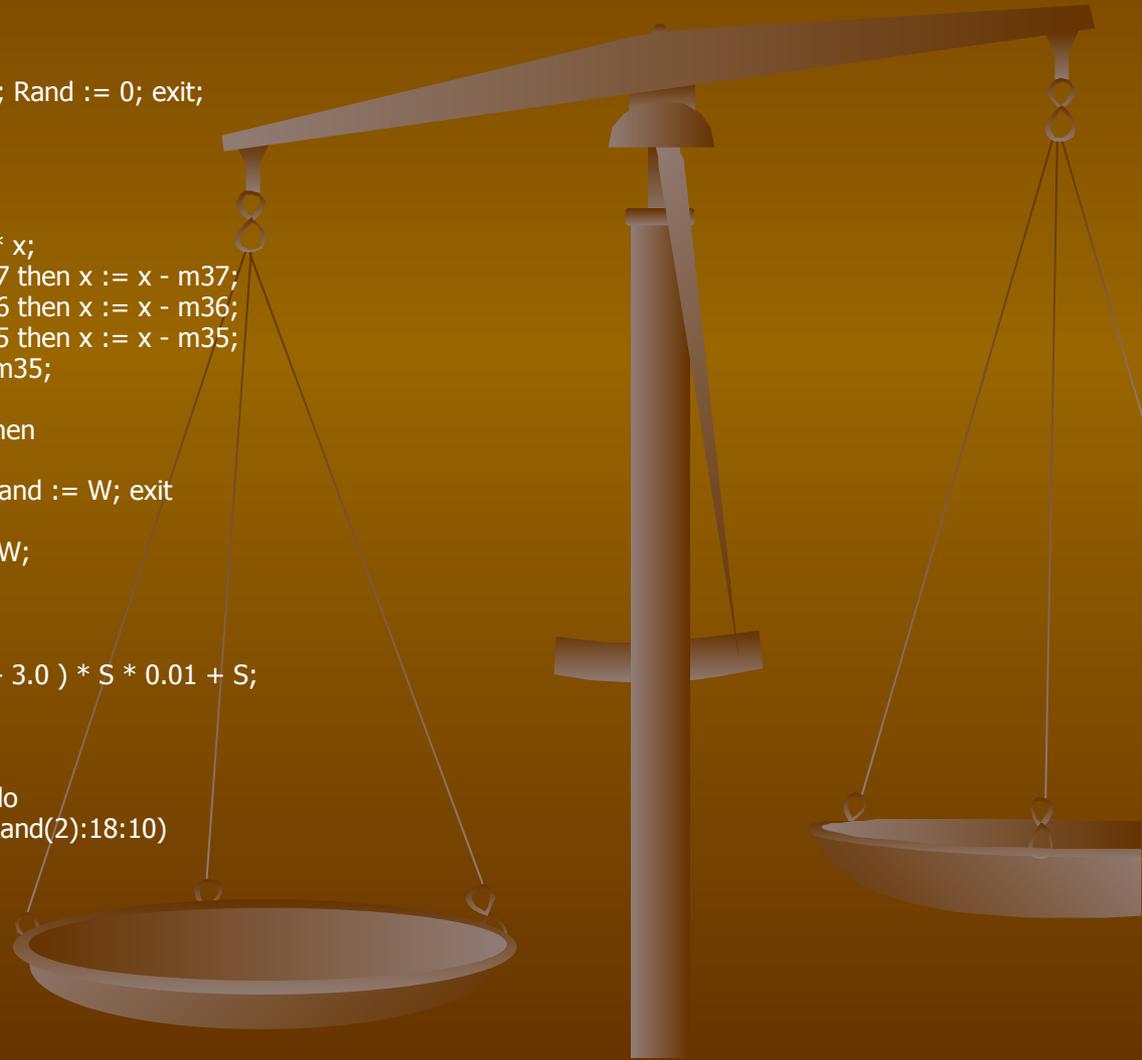
$$x = \sigma_x \cdot \sqrt{\frac{12}{N}} \cdot \left(\sum_{i=1}^N R_i - \frac{N}{2} \right) + M_x$$



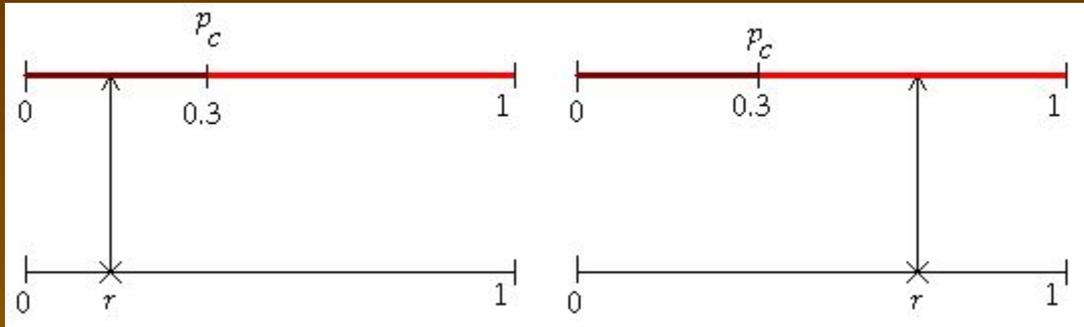
```
var n, i:integer;
x,R:double;
  Const m34: double = 28395423107.0;
      m35: double = 34359738368.0;
      m36: double = 68719476736.0;
      m37: double = 137438953472.0;
function Rand(n:integer):double;
var S, W: double;
  i: integer;
begin
  if n = 0 then
  begin
    x := m34; Rand := 0; exit;
  end;
  S := -2.5;
  for i := 1 to 5 do
  begin
    x := 5.0 * x;
    if x > m37 then x := x - m37;
    if x > m36 then x := x - m36;
    if x > m35 then x := x - m35;
    w := x / m35;

    if n = 1 then
    begin
      Rand := W; exit
    end;
    S := S + W;
  end;

  S := S * 1.54919;
  Rand := ( sqrt(S) - 3.0 ) * S * 0.01 + S;
end;
begin
  R := Rand(0);
  for i := 1 to 200 do
    writeln( Rand(2):18:10)
  end.
end.
```

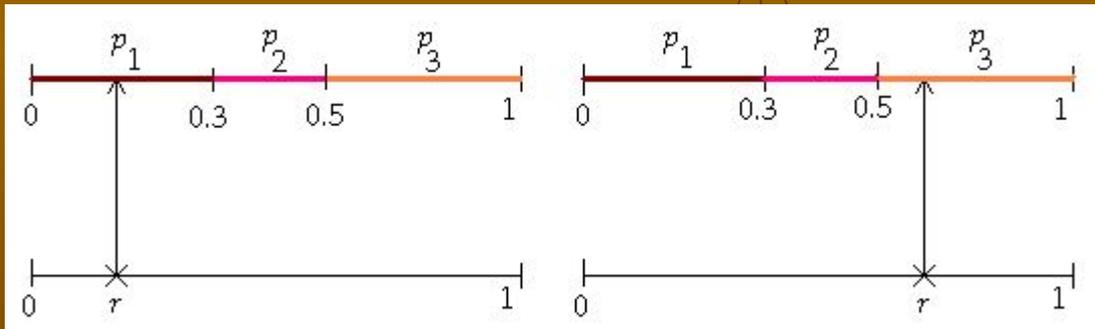


Моделирование случайных событий



$$A = (A_1, A_2, A_3 \dots A_n)$$

$$A = A_1 \left\{ \sum_{n=0}^{n-1} P_n \langle r \langle \sum_{n=0}^n P_n \right.$$



зависимые события A и B (B зависит от A)
 безусловная вероятность $P(A)$ события A
 условные вероятности $P(B/A)$ и $P(A/B)$,

$$r \rangle \sum_{n=1}^n P_i$$

Моделирование непрерывных случайных величин

- Метод нелинейных преобразований
- Метод композиций
- Табличный метод

$$x = -\frac{l}{\lambda} \cdot \ln(r)$$

$$x = m + s \left[\sum_{i=1}^{12} r_i - 6 \right]$$

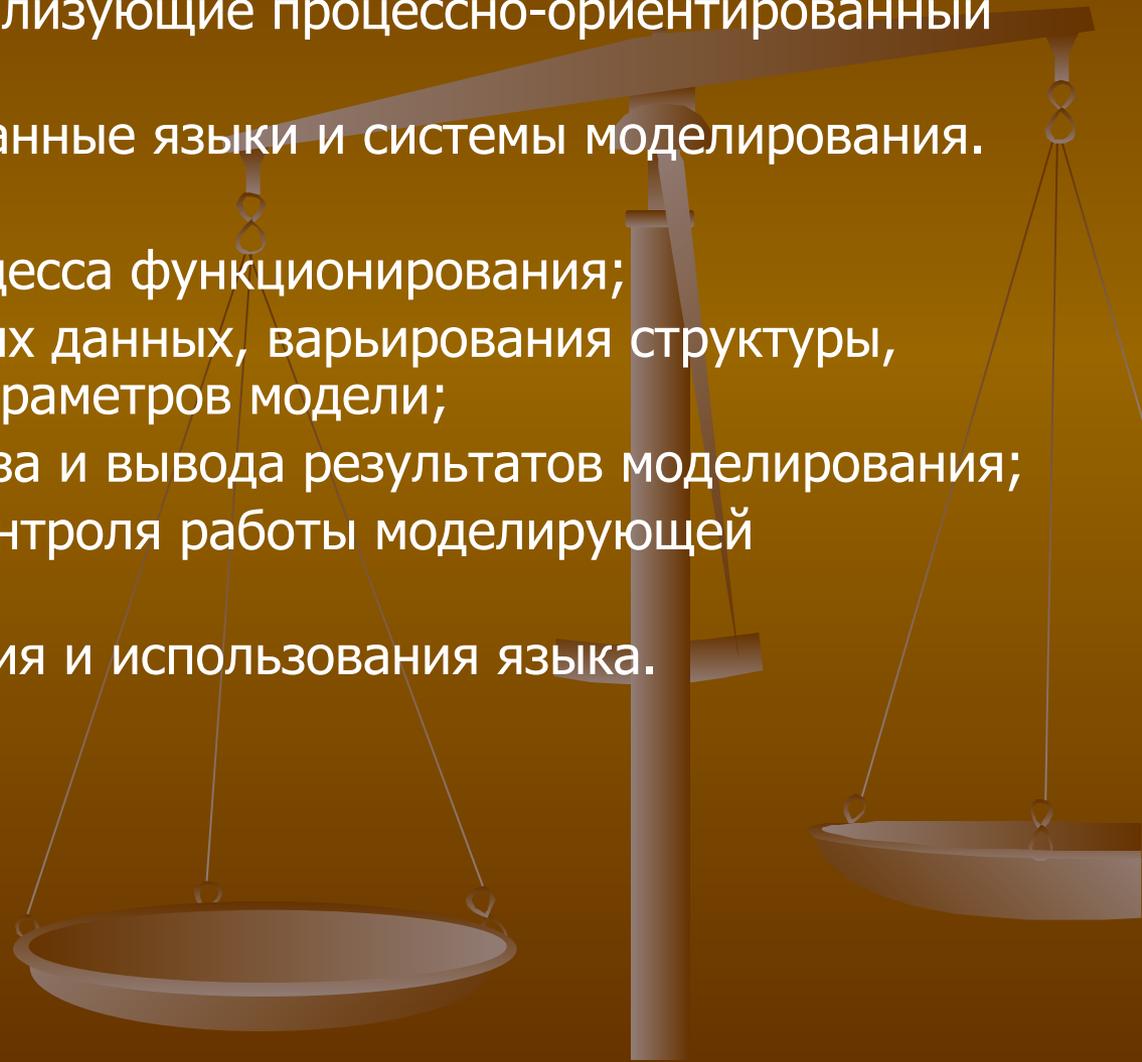
$$x = 5 \left[\sum_{i=1}^{12} r_i - 6 \right]$$

$$y = 5 \left[\sum_{i=1}^{12} r_i - 6 \right]$$

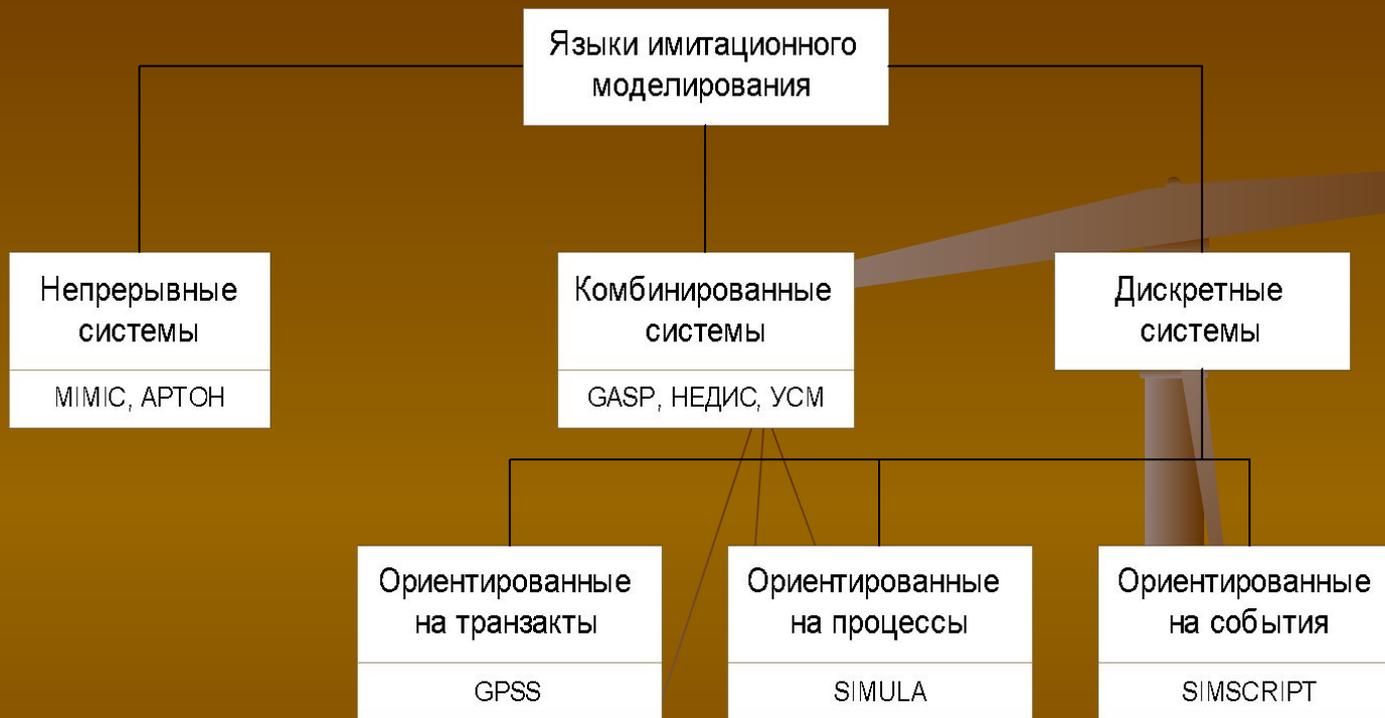


Моделирование систем и языки моделирования

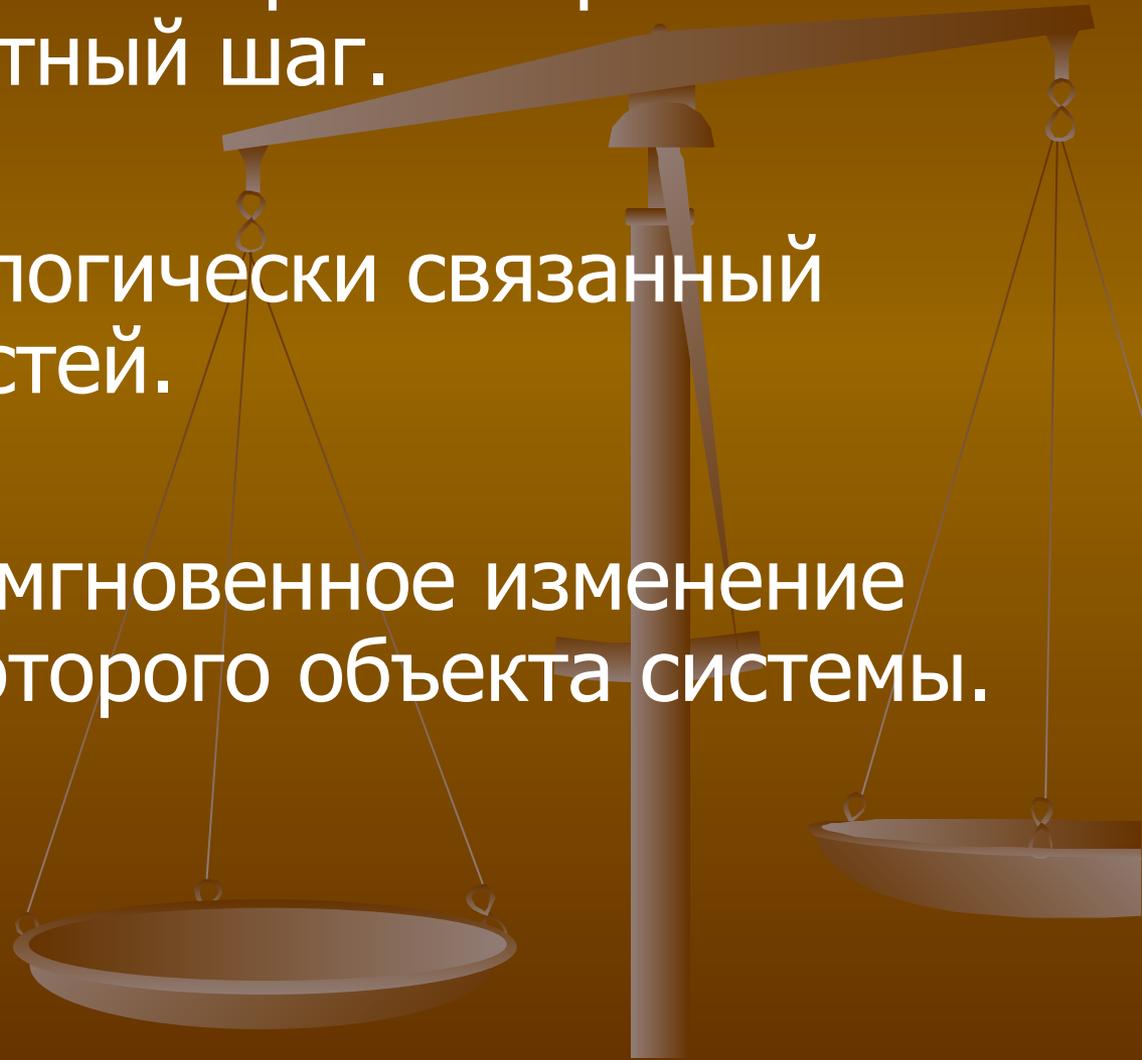
- Универсальные алгоритмические языки высокого уровня.
- Специализированные языки моделирования: языки, реализующие событийный подход, подход сканирования активностей, языки, реализующие процессно-ориентированный подход.
- Проблемно-ориентированные языки и системы моделирования.
 - Удобство описания процесса функционирования;
 - Удобство ввода исходных данных, варьирования структуры, алгоритмов работы и параметров модели;
 - Эффективностью анализа и вывода результатов моделирования;
 - Простотой отладки и контроля работы моделирующей программы;
 - Доступностью восприятия и использования языка.



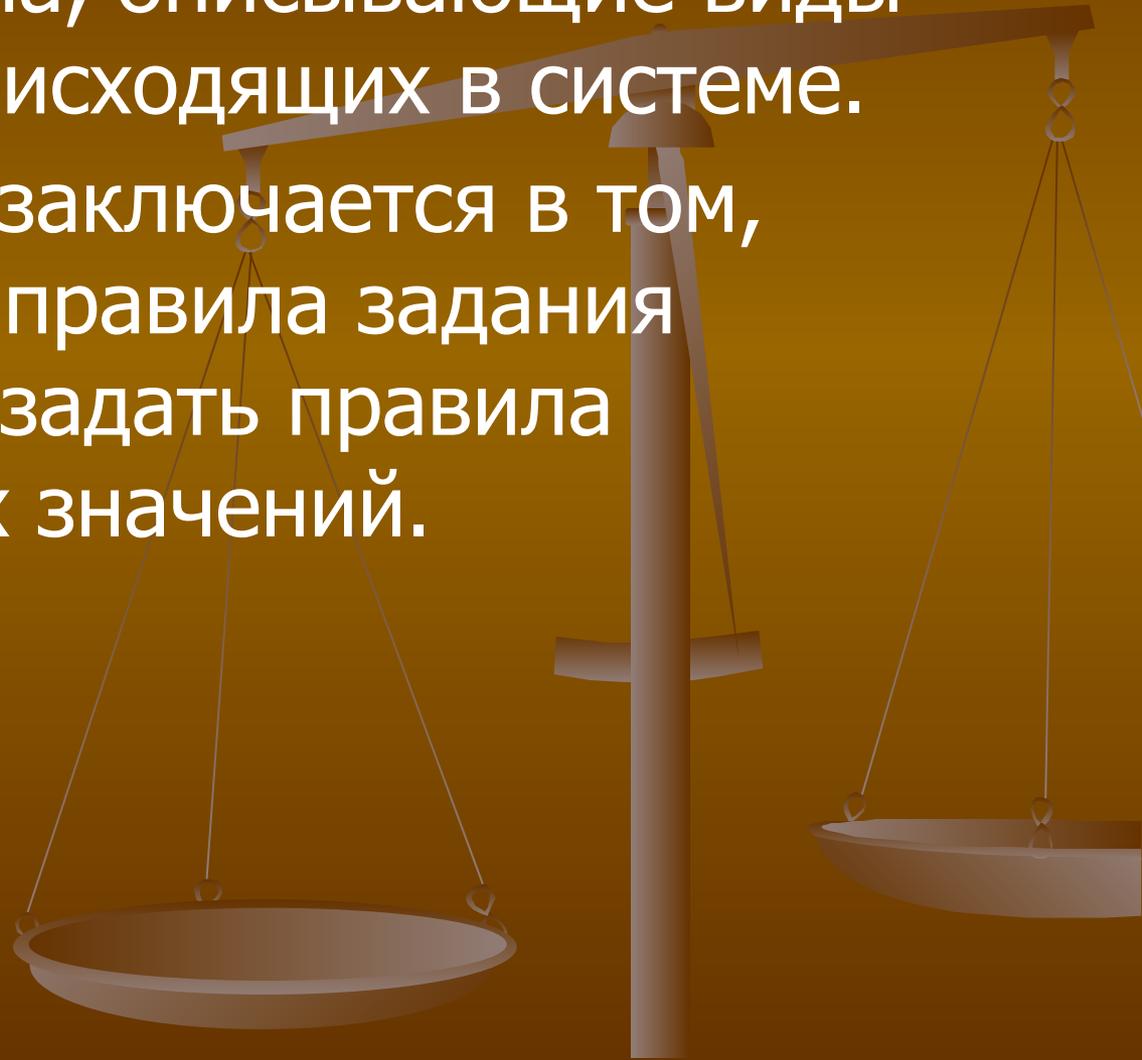
Языки имитационного моделирования

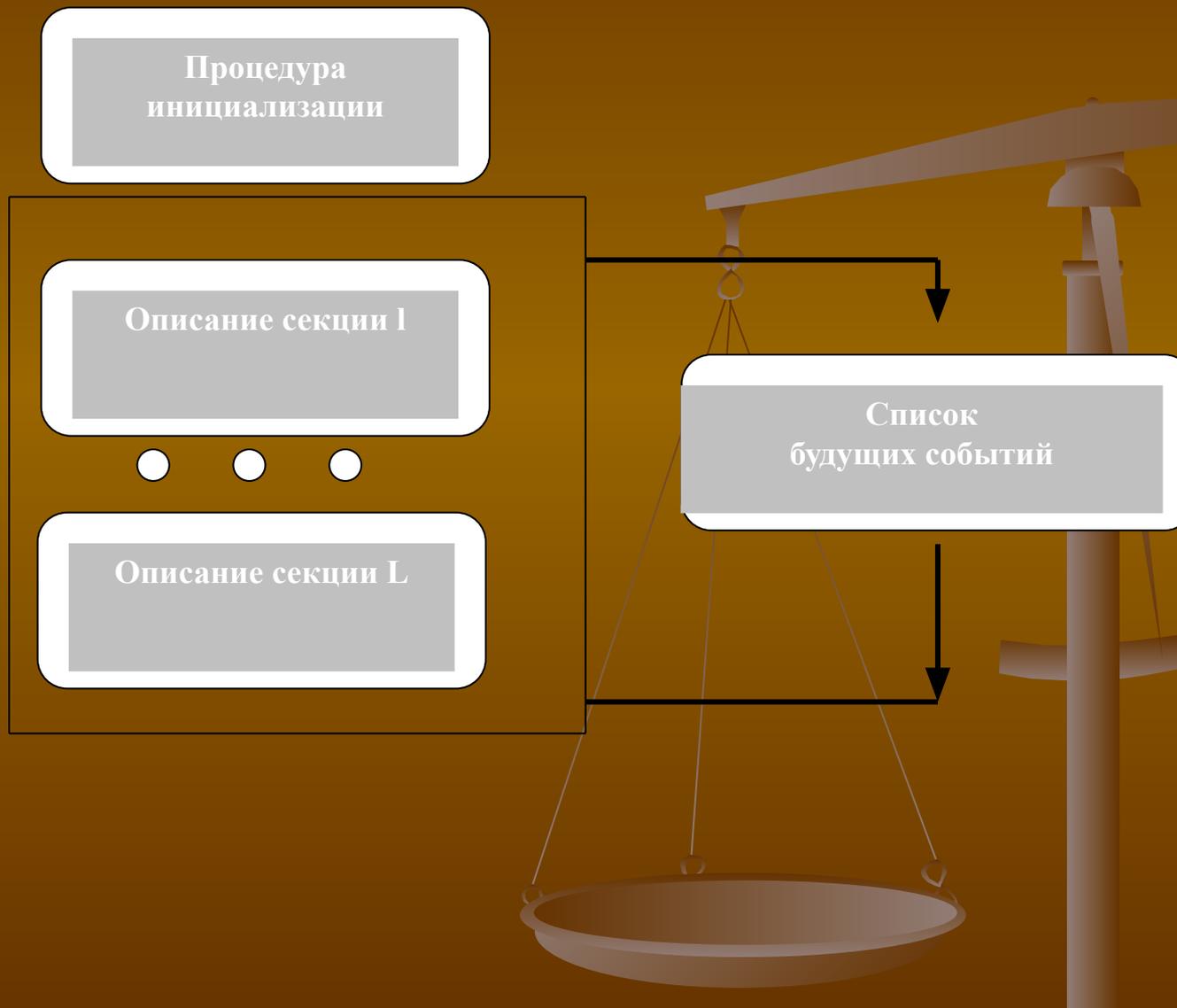


- **АКТИВНОСТЬЮ** является наименьшая единица работы и её рассматривают как единый дискретный шаг.
- **Процесс** – это логически связанный набор активностей.
- **События** – это мгновенное изменение состояния некоторого объекта системы.



- Первая задача сводится к тому, чтобы описать правила, описывающие виды процессов, происходящих в системе.
- Вторая задача заключается в том, чтобы описать правила задания атрибутов или задать правила генерации этих значений.





Процедура
инициализации

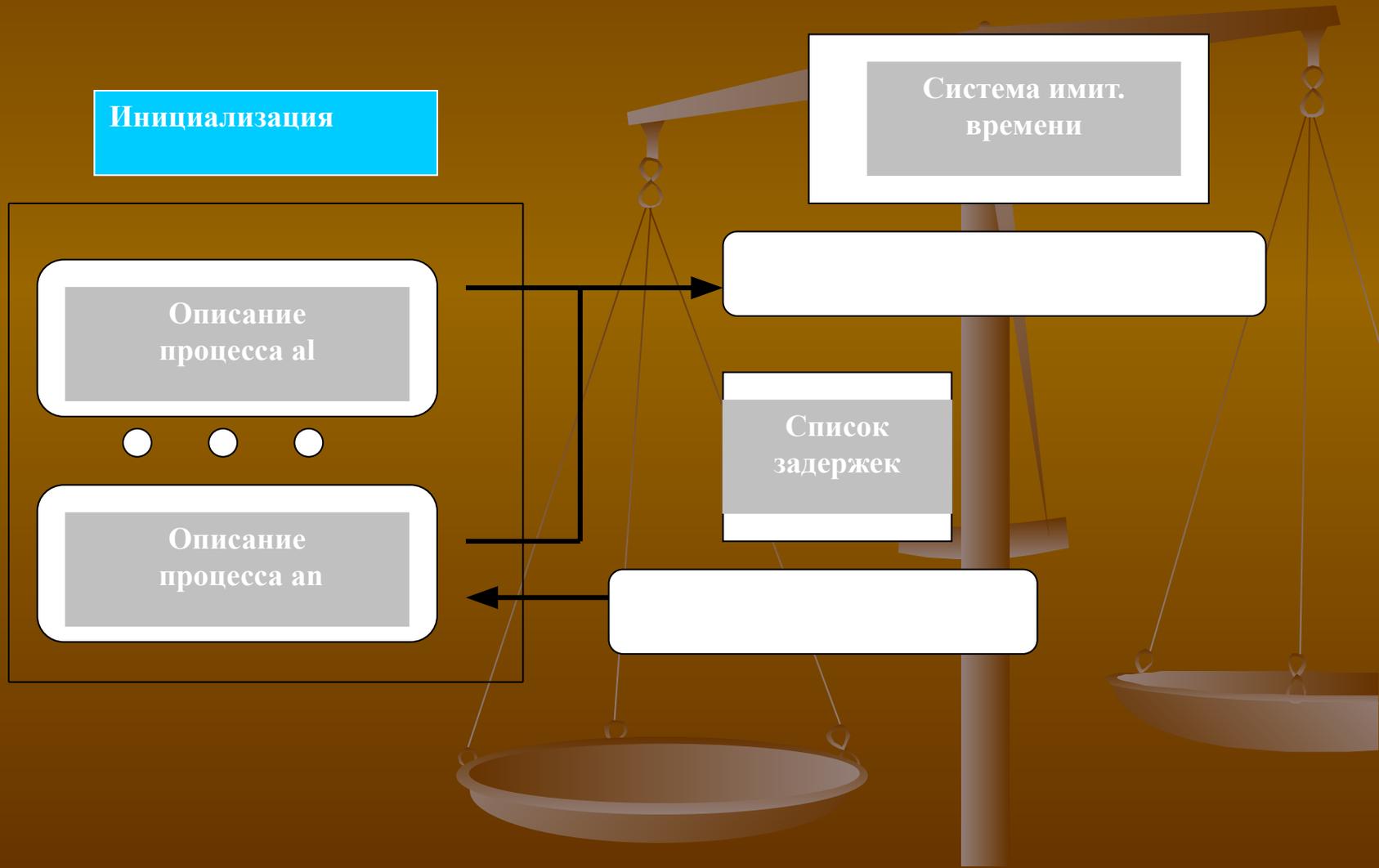
Описание секции I

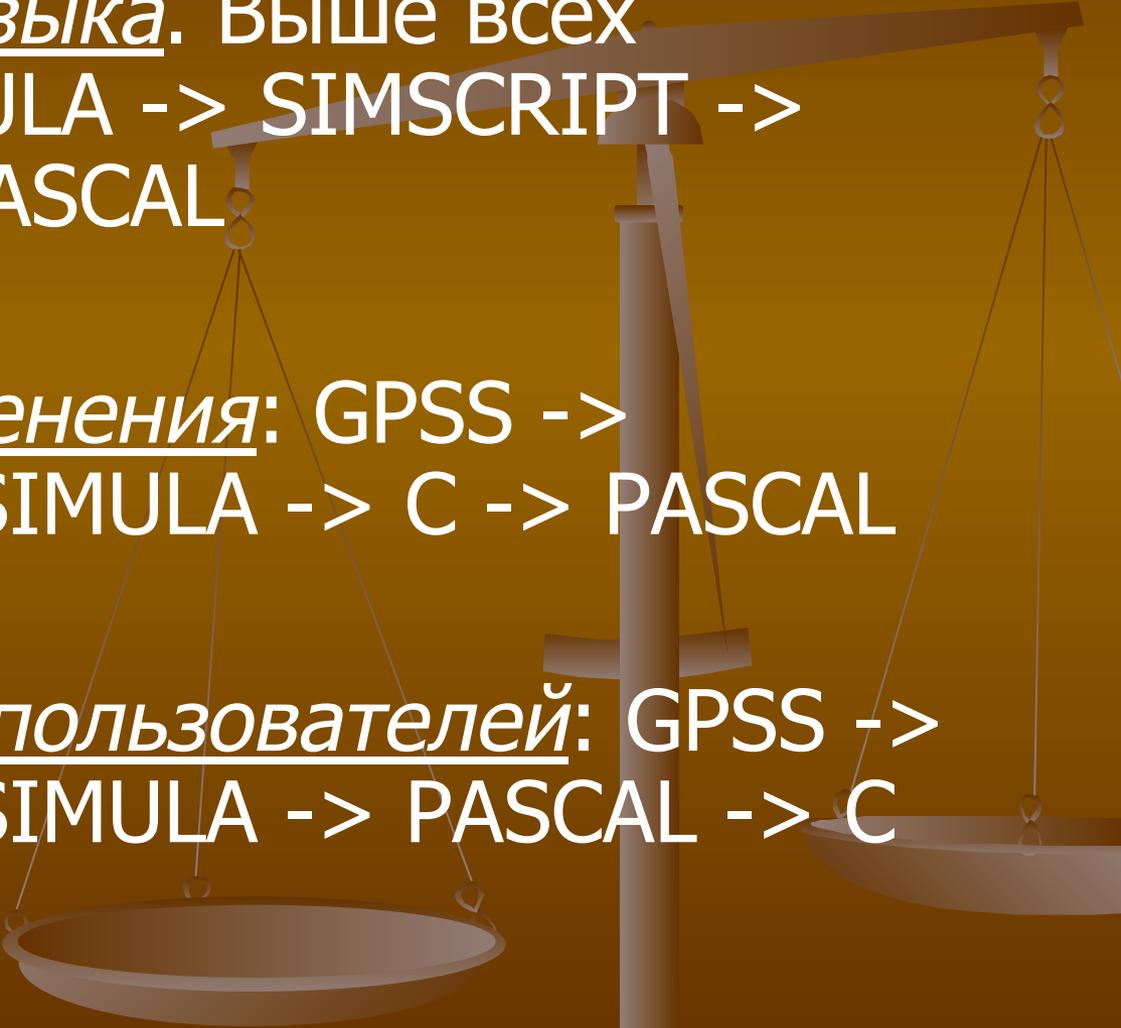


Описание секции L

Список
будущих событий

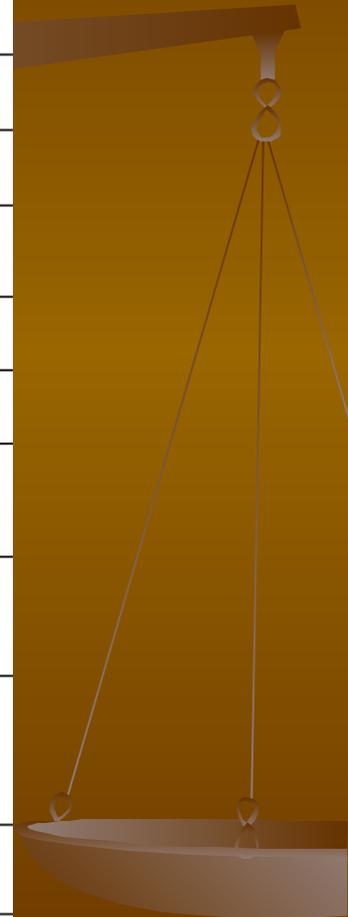
Языки, ориентированные на процессы



- Возможность языка. Выше всех находится SIMULA -> SIMSCRIPT -> GPSS -> C -> PASCAL
 - Простота применения: GPSS -> SIMSCRIPT -> SIMULA -> C -> PASCAL
 - Предпочтение пользователей: GPSS -> SIMSCRIPT -> SIMULA -> PASCAL -> C
- 

Сравнение универсальных и специализированных языков программирования при моделировании

Преимущества	Недостатки
Универсальные	
Минимум ограничений на выходной формат	Значительное время, затрачиваемое на программирование
Широкое распространение	Значительное время, затрачиваемое на отладку
Специализированные	
Меньше затраты времени на программирование	Необходимость точно придерживаться ограничений на форматы данных
Более эффективные методы выявления ошибок	Меньшая гибкость модели
Краткость, точность понятий, характеризующих имитируемые конструкции	
Возможность заранее строить стандартные блоки, которые могут использоваться в любой имитационной модели	
Автоматическое формирование определенных типов данных, необходимых именно в процессе имитационного моделирования	
Удобство накопления и представления выходной информации	
Эффективное использование ресурсов	



Основные концепции языка РДО (Ресурсы, действия, операции)

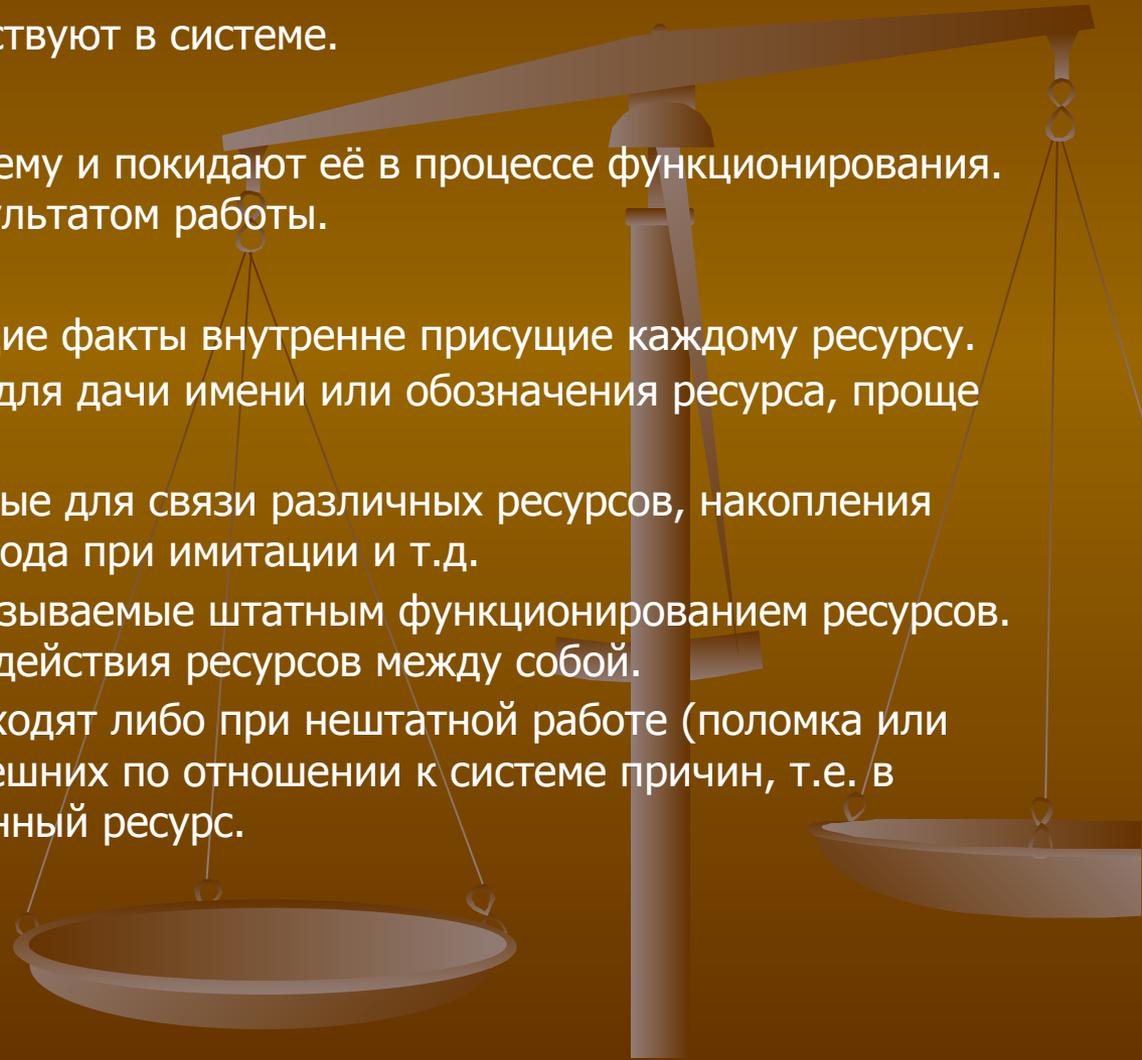
- Универсальность имитационного моделирования относительно класса исследуемых систем и процессов:
- Легкости модификации моделей;
- Моделирование сложных систем управления совместно с управляемым объектом (включая использования имитационного моделирования в режиме реального времени).
- **Классы и отношения** трактуются как база данных, содержащая декларативные знания. Процедуры представляют собой набор модифицированных продукционных правил: ЕСЛИ – ТО ДЕЙСТВИЕ.
- **Управляющая структура** – это интерпретатор правил, управляющий выборкой правил.
- **Условие** – это проверка состояние базы данных.
- **Действие** – изменяет некоторым образом базу данных.
- **Достоинства** системы основанной на продукциях:
 - Простота создания и понимания, отдельных правил;
 - Легкость модификации;
- **Недостатки:**
 - Неясность взаимных отношений правил;
 - Сложность оценки целостного образа знаний;
 - Низкая эффективность обработки;
- **ЕСЛИ <УСЛОВИЕ>, ТО <СОБЫТИЕ 1> ... ЖДАТЬ (отведенный интервал) ... ТО <СОБЫТИЕ 2>**

Ресурсы

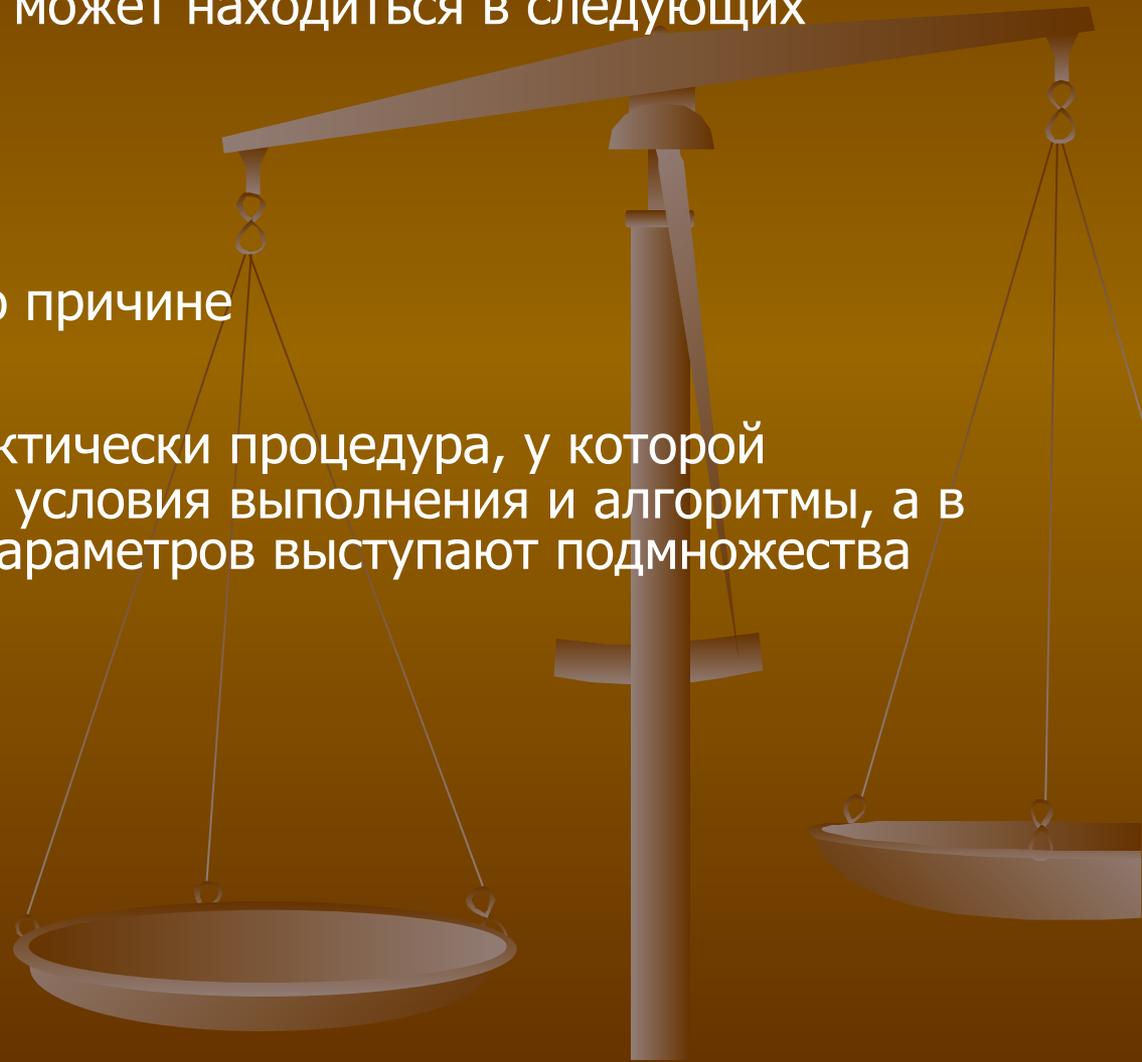
- **Ресурс** – это элемент сложной системы, внутренней структурой которого можно пренебречь, в то время как наличие и свойства его, как целого, важны и существенны для описания.

Постоянные. Они всегда присутствуют в системе.

- Временные. Поступают в систему и покидают её в процессе функционирования. Причем они могут быть и результатом работы.
- **Описательные**, представляющие факты внутренне присущие каждому ресурсу.
- **Указывающие**, используемые для дачи имени или обозначения ресурса, проще говоря, идентификаторы.
- **Вспомогательные**, используемые для связи различных ресурсов, накопления статистики, графического вывода при имитации и т.д.
- **Регулярные** – это события, вызываемые штатным функционированием ресурсов. Они выражают логику взаимодействия ресурсов между собой.
- **Нерегулярные события** происходят либо при нештатной работе (поломка или отказ) ресурса, либо из-за внешних по отношению к системе причин, т.е. в систему пришел новый временный ресурс.



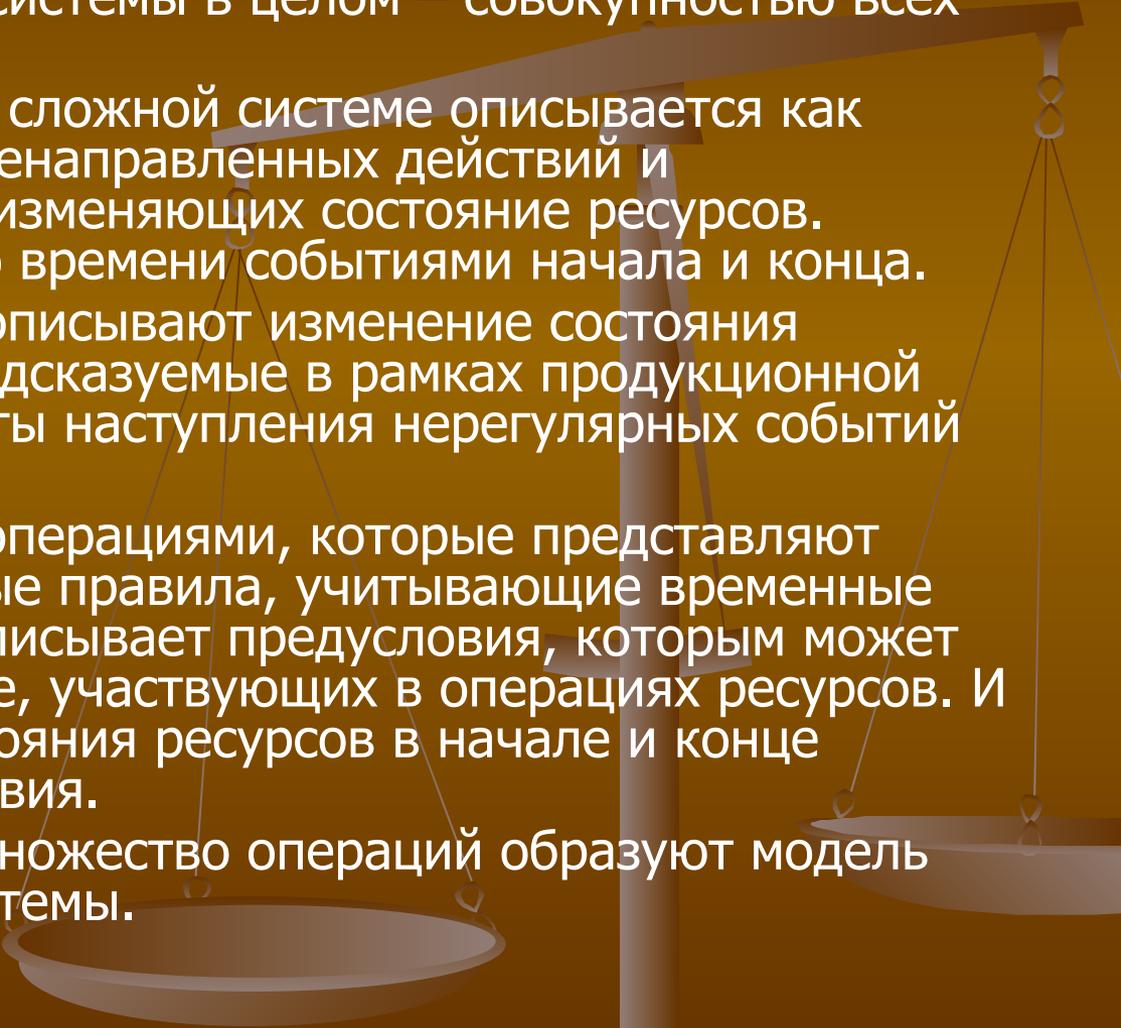
- **Действие** представляет собой целенаправленное мероприятие, выполняемое под управлением некоторой подсистемы и направленное на достижение определенной цели. Поэтому действие планируется и может находиться в следующих состояниях:
 - Запланировано
 - Начато
 - Окончено
 - Прервано по какой-либо причине
- **Операция** — это фактически процедура, у которой формальные параметры условия выполнения и алгоритмы, а в качестве фактических параметров выступают подмножества ресурсов.



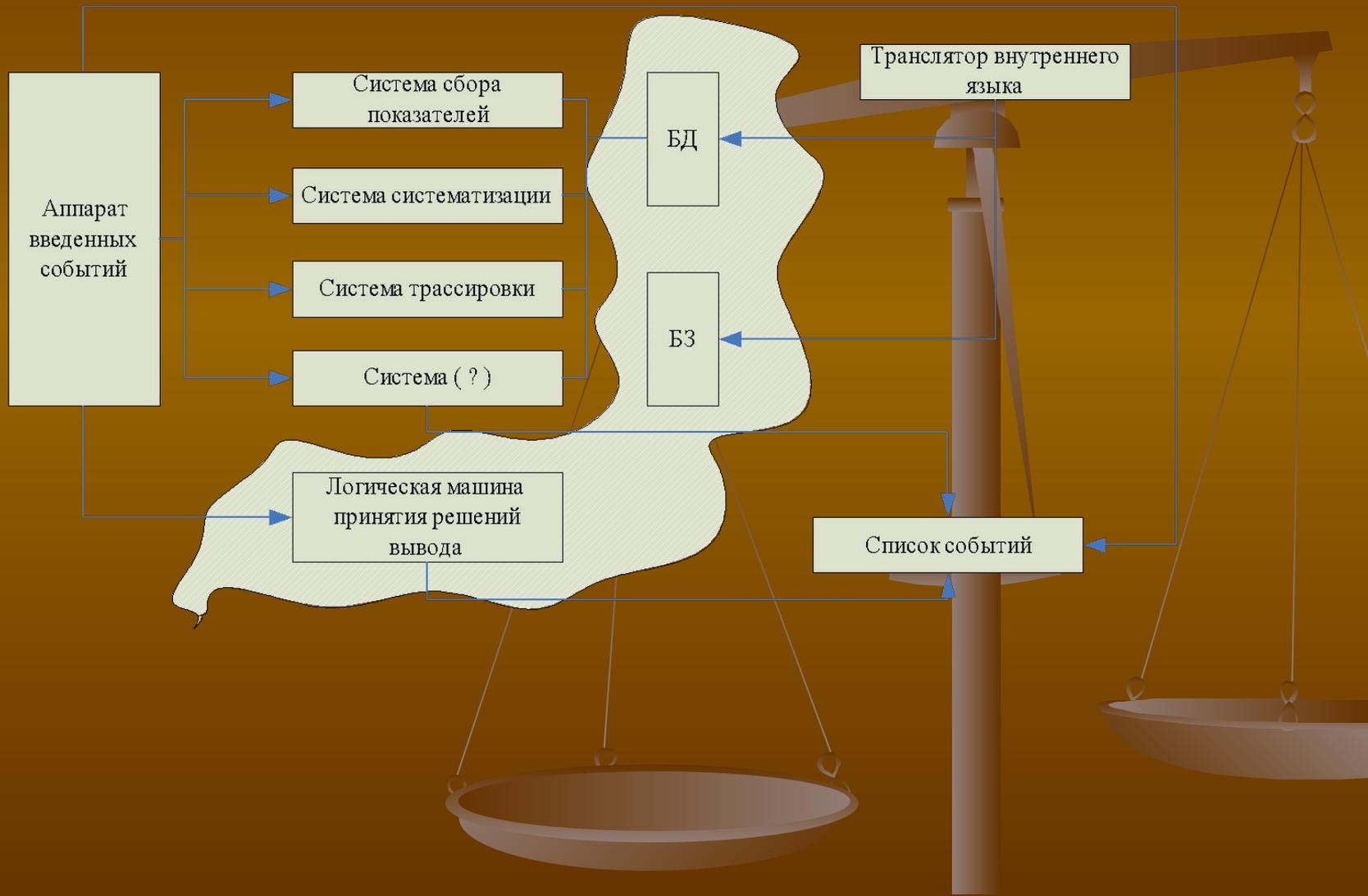
Представление сложной дискретной системы в РДО методе



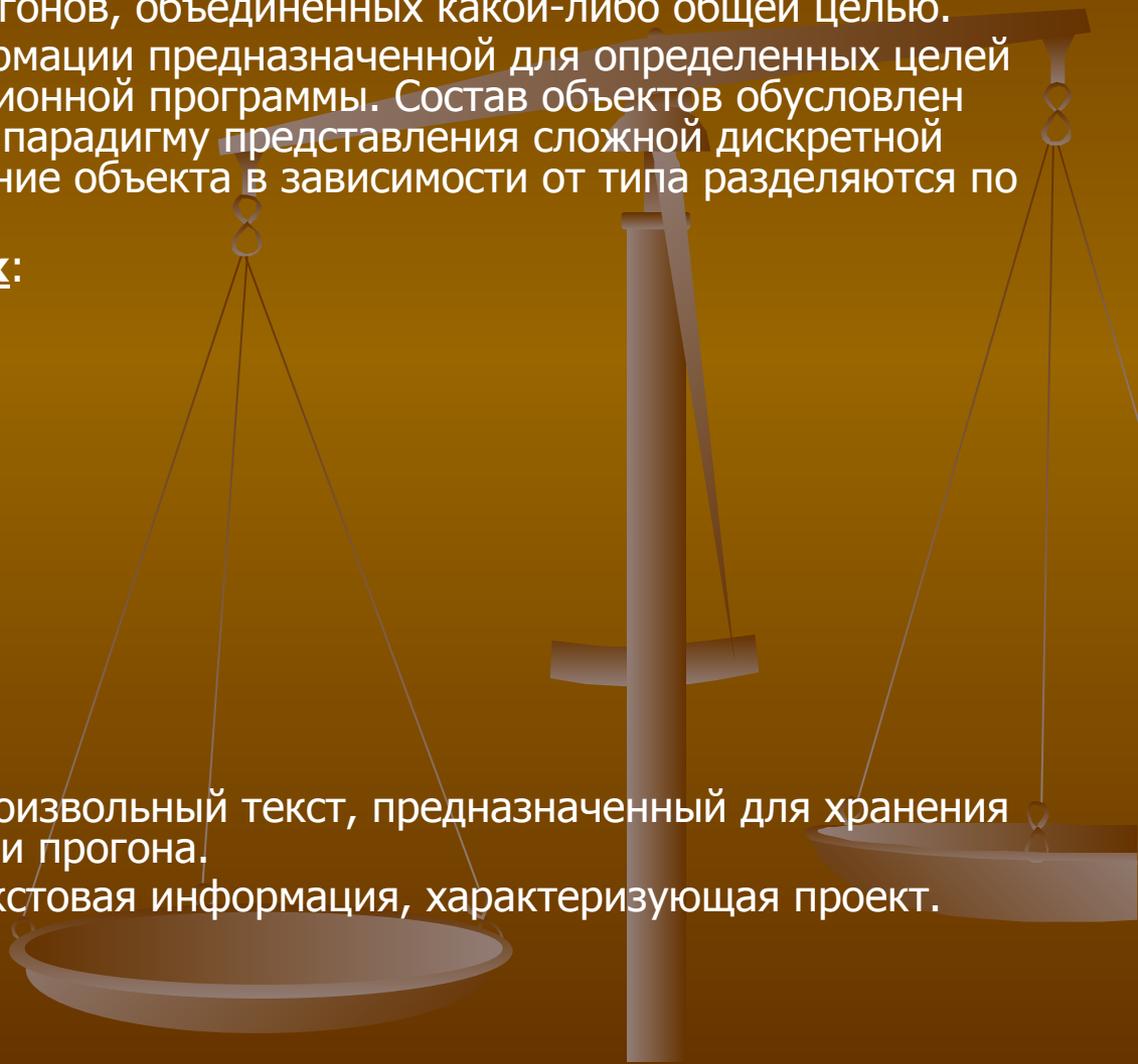
Основные положения РДО-метода

- Каждый ресурс определенного типа описывается одними и теми же параметрами.
 - Состояние ресурса определяется вектором значений всех его параметров. Состояние системы в целом – совокупностью всех его параметров.
 - Процесс протекающий в сложной системе описывается как последовательность целенаправленных действий и нерегулярных событий, изменяющих состояние ресурсов. Действия ограничены во времени событиями начала и конца.
 - Нерегулярные события описывают изменение состояния сложной системы не предсказуемые в рамках продукционной модели системы. Моменты наступления нерегулярных событий случайны.
 - Действия описываются операциями, которые представляют собой модифицированные правила, учитывающие временные параметры. Операция описывает условия, которым может удовлетворять состояние, участвующих в операциях ресурсов. И правила изменения состояния ресурсов в начале и конце соответствующего действия.
 - Множество ресурсов и множество операций образуют модель сложной дискретной системы.
- 

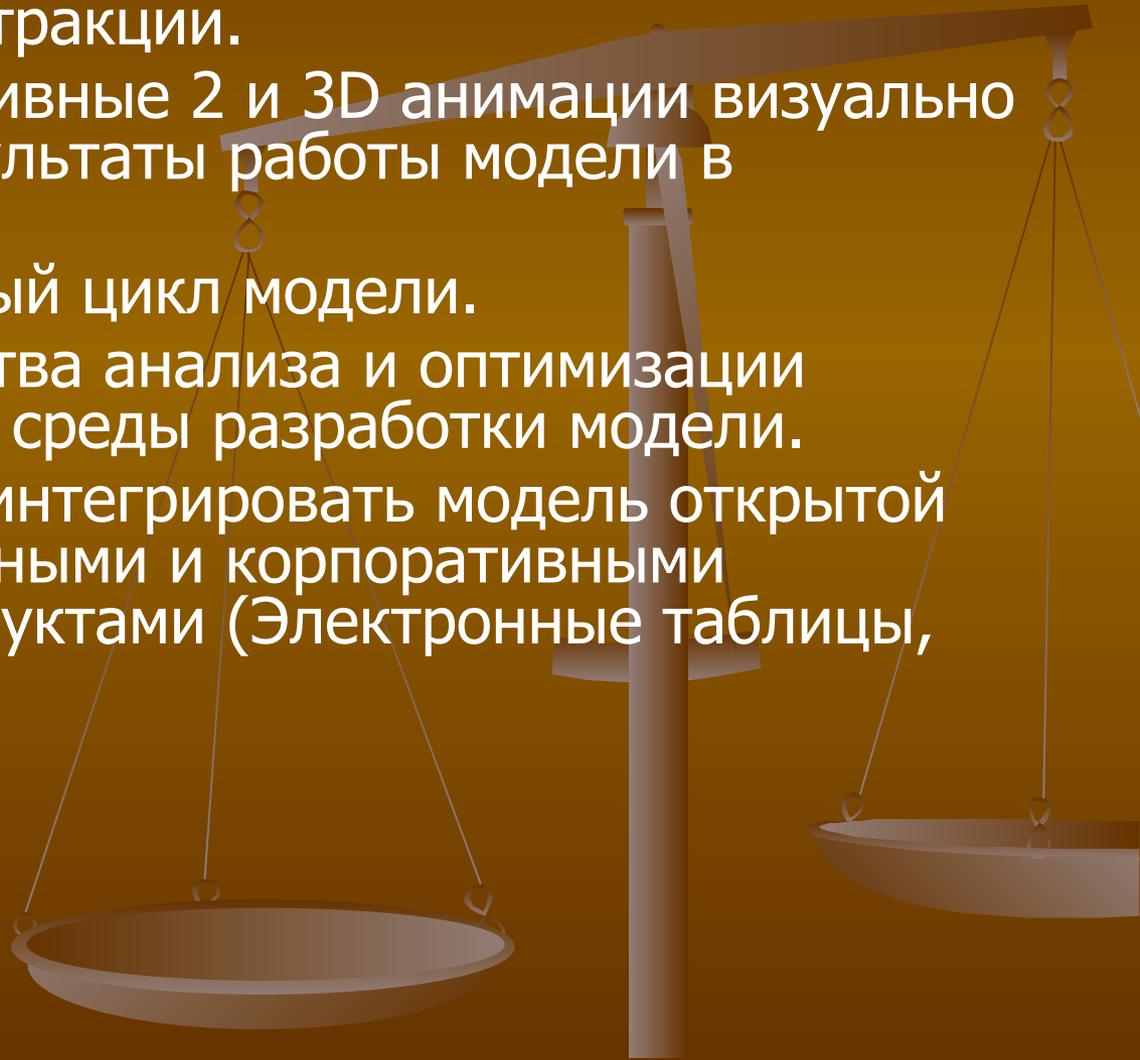
Структура РДО имитатора

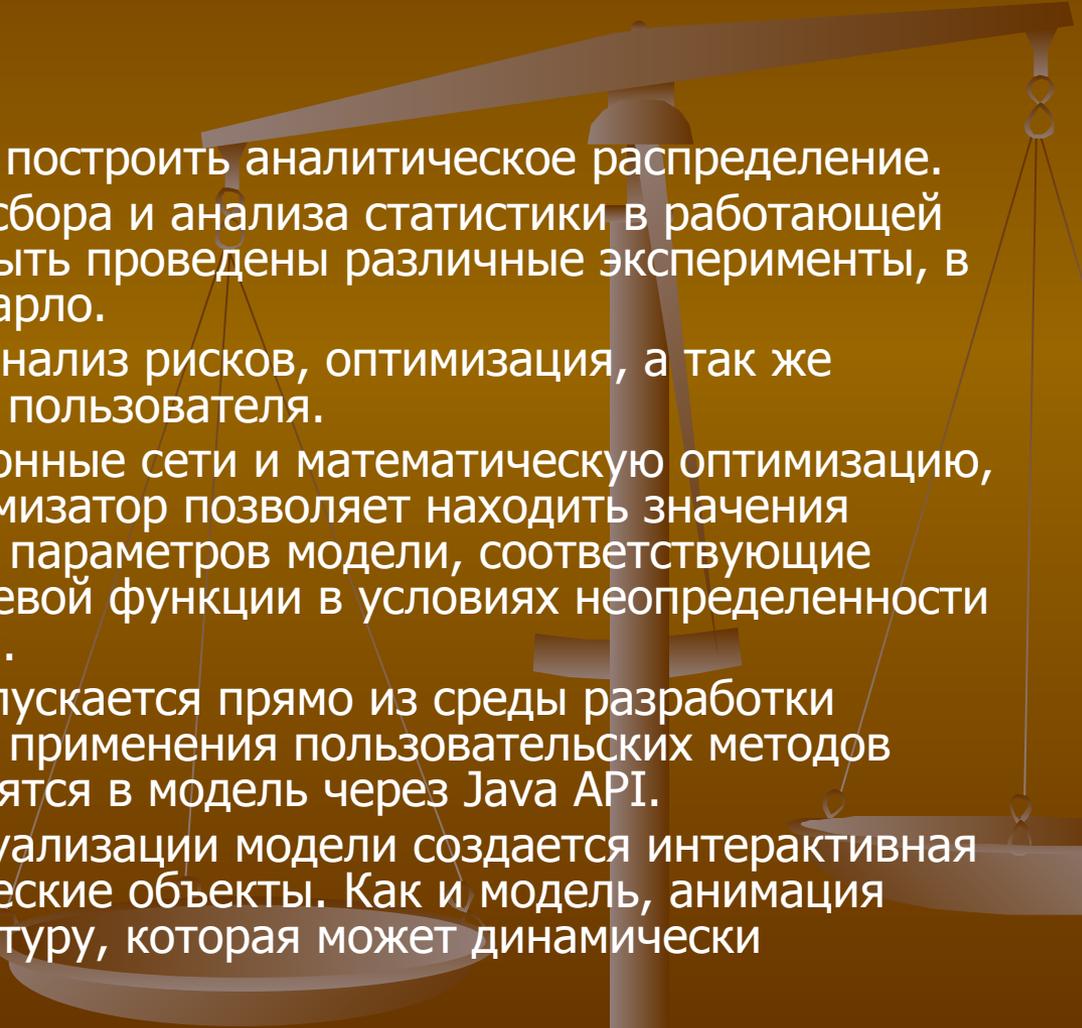


- **Модель** – совокупность объектов РДО языка, определяющих реальный объект, собираемый в процессе имитации показателей, кадры анимации, различные графические элементы, результаты трассировки.
- **Прогон** – единая неделимая точка имитационного эксперимента. Характеризуется совокупностью объектов представляющих собой исходные данные и результаты.
- **Проект** – один или более прогонов, объединенных какой-либо общей целью.
- **Объект** – совокупность информации предназначенной для определенных целей и имеющей смысл для имитационной программы. Состав объектов обусловлен РДО методом, определяющим парадигму представления сложной дискретной системы на языке РДО. Описание объекта в зависимости от типа разделяются по разным модулям.
- **Объекты исходных данных:**
 - типы ресурсов,
 - образцы операций,
 - операции,
 - точки принятия решений,
 - константы,
 - функции,
 - последовательности,
 - кадры анимации,
 - требуемая статистика,
 - результаты трассировки.
- **Комментарий прогона** – произвольный текст, предназначенный для хранения сопроводительной информации прогона.
- **Комментарий проекта** – текстовая информация, характеризующая проект.



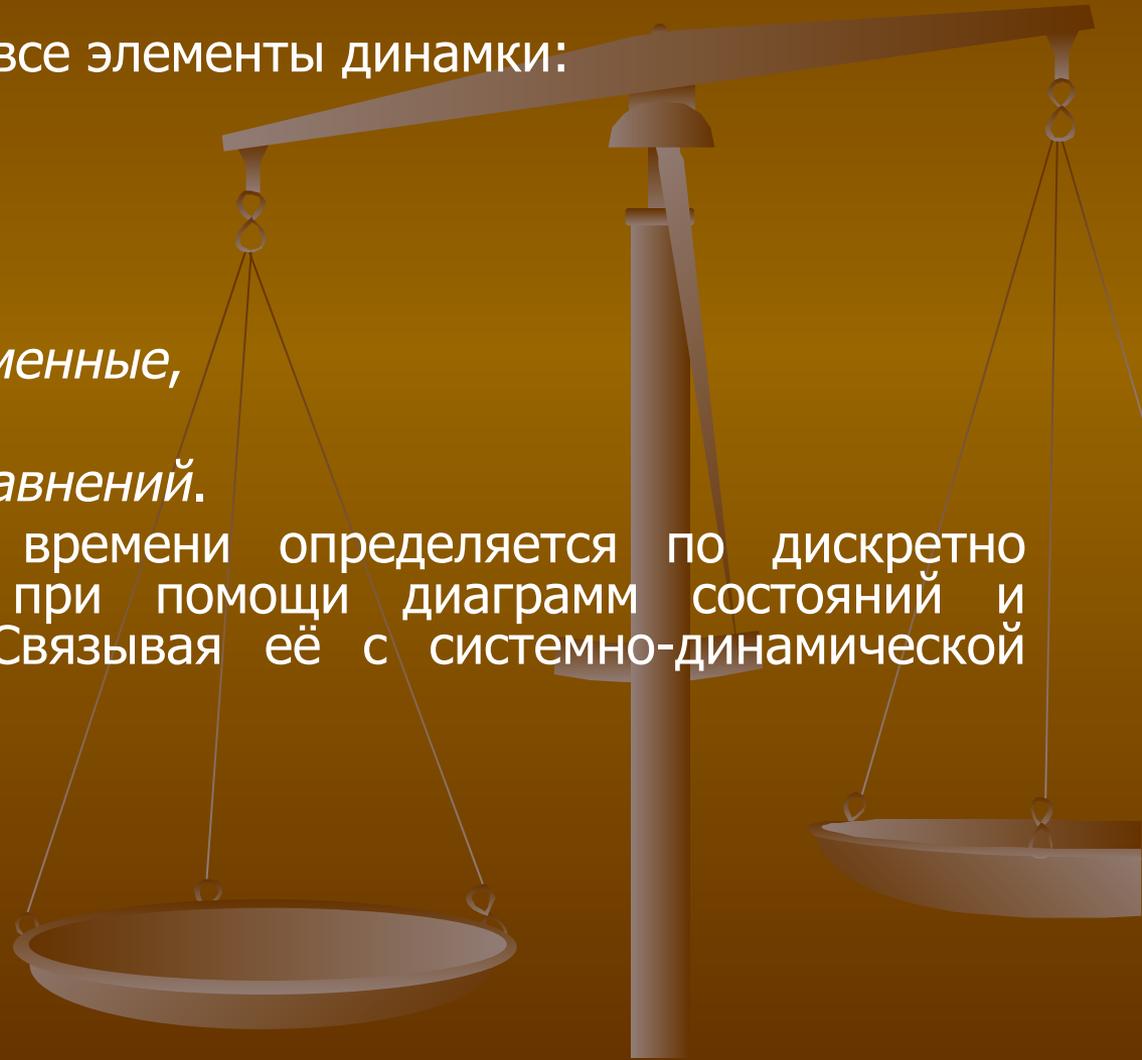
- Позволяет моделировать при помощи визуальных компонент как стандартных, так и разработанных пользователем.
- Программировать иерархические структуры на разных уровнях абстракции.
- Создавать интерактивные 2 и 3D анимации визуально отображающие результаты работы модели в реальном времени.
- Увеличить жизненный цикл модели.
- Использовать средства анализа и оптимизации непосредственно из среды разработки модели.
- Достаточно просто интегрировать модель открытой архитектуры с офисными и корпоративными программными продуктами (Электронные таблицы, БД и БЗ и т.д.)



- отображение результатов
 - библиотеки численных методов
 - базы данных
 - анализ параметров
 - оптимизация
 - анализ результатов
-
- С помощью СтатФит можно построить аналитическое распределение.
 - В систему входят средства сбора и анализа статистики в работающей модели. С моделью могут быть проведены различные эксперименты, в том числе и метод Монте-Карло.
 - Анализ чувствительности, анализ рисков, оптимизация, а так же эксперименты по сценарию пользователя.
 - Сочетания эвристики, нейронные сети и математическую оптимизацию, встроенный в систему оптимизатор позволяет находить значения дискретных и непрерывных параметров модели, соответствующие максимуму и минимуму целевой функции в условиях неопределенности и при наличии ограничений.
 - Модуль настраивается и запускается прямо из среды разработки моделей. Есть возможность применения пользовательских методов оптимизации, которые вносятся в модель через Java API.
 - С помощью технологии визуализации модели создается интерактивная анимация связывая графические объекты. Как и модель, анимация имеет иерархическую структуру, которая может динамически изменяться.
- 

Уровни моделирования:

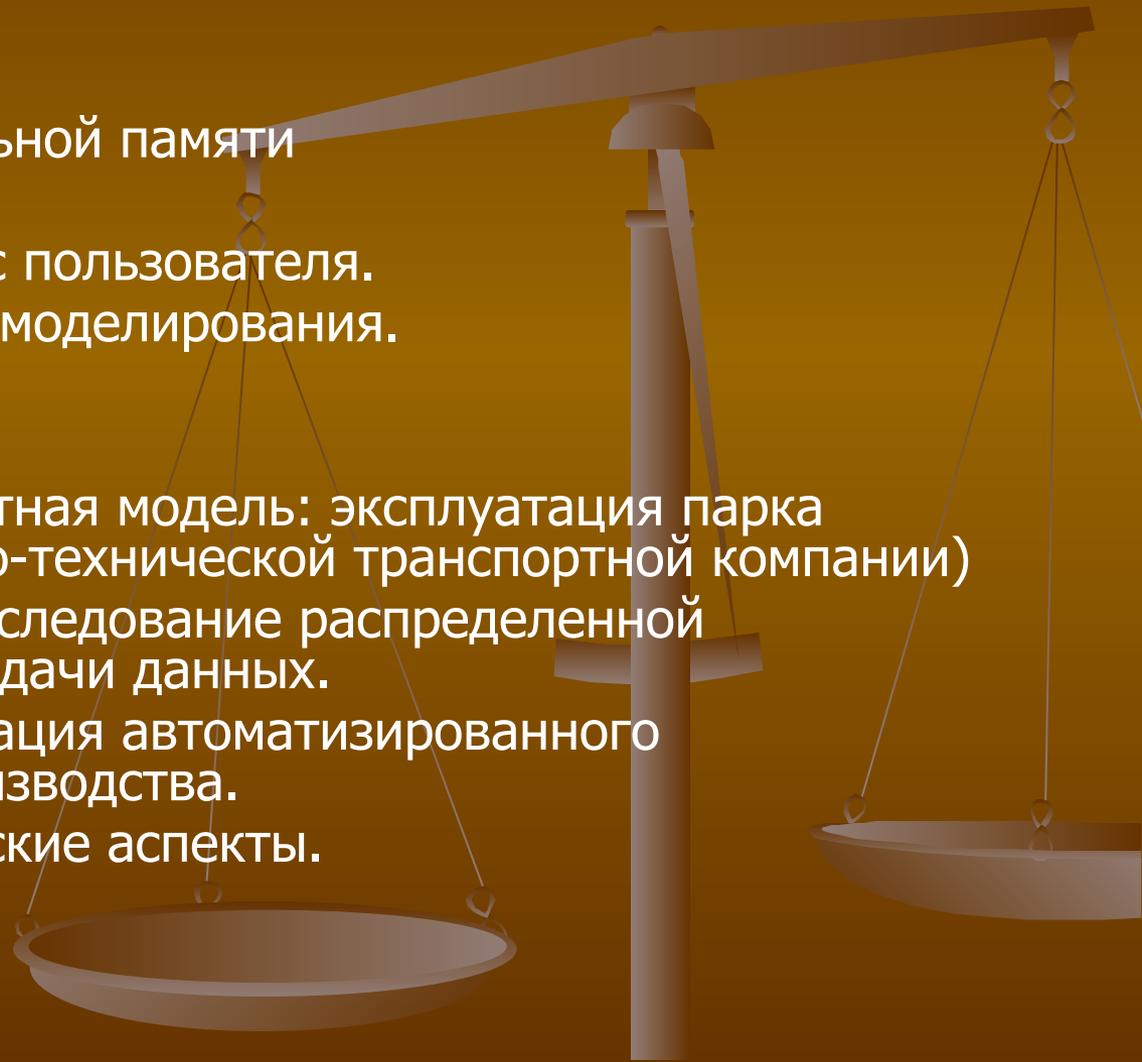
- Стратегический
 - Операционный
 - Физический
-
- Система поддерживает все элементы динамики:
 - *накопители,*
 - *потоки,*
 - *обратные связи,*
 - *задержки,*
 - *вспомогательные переменные,*
 - *табличные функции,*
 - *решение различных уравнений.*
 - Протяжка модельного времени определяется по дискретно событийному уровню при помощи диаграмм состояний и диаграмм процессов. Связывая её с системно-динамической частью.



Язык GPSS – общецелевая система моделирования, предназначенная для имитационного моделирования сложных дискретных систем версий 1, 2, V, GPSS /PC, GPSS WORLD.

- Позволяет:
- Многозадачность
- Использование виртуальной памяти
- Интерактивность
- Графический интерфейс пользователя.
- Визуализация процесса моделирования.

- Основное применение:
- Транспорт (самая известная модель: эксплуатация парка самолетов в авиационно-технической транспортной компании)
- Сетевые технологии. Исследование распределенной региональной сети передачи данных.
- Промышленность. Имитация автоматизированного металлургического производства.
- Финансовые и медицинские аспекты.



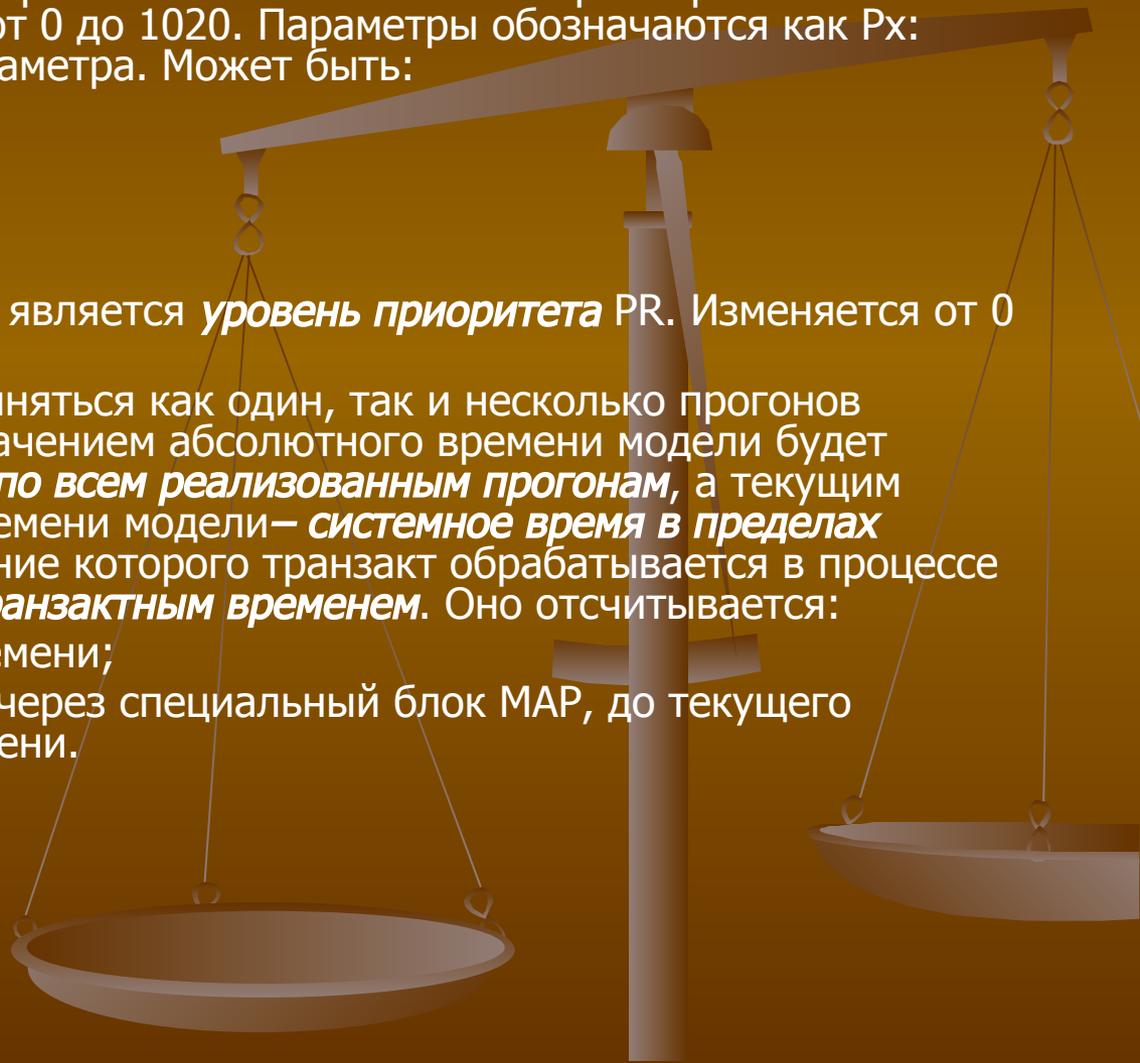
Категория	Типы
Динамическая	Транзакция
Операционная	Блоки
Аппаратная	Устройства памяти, ключи
Вычислительная	Переменные, арифметические, логические, функции
Статистическая	Очереди, таблицы
Запоминающая	Ячейки, матрицы ячеек
Группирующие	Списки, группы

Программа-диспетчер

- Обеспечивает, заданные программистом, маршруты
- Продвижение динамических объектов, называемых **транзактами** (заявками или сообщениями).
- Планирование событий происходящих в модели, путем регистрации времени наступления события и реализацию этих событий в нарастающей временной последовательности.
- Регистрация статистической информации.
- **Динамическими объектами** являются транзакты, которые представляют собой единицы исследуемых потоков и производят ряд определенных действий, продвигаясь по фиксированной структуре, представляющей собой совокупность объектов других категорий.
- **Операционный объект.** Блоки задают логику функционирования системы и определяют маршрут движения транзактов между **объектами аппаратной категории**.
- **Вычислительный объект.** Служит для описания таких операций в процессе моделирования, когда связи между элементами моделируемой системы наиболее просто выражаются в виде математических соотношений.
- К **статистическим объектам** относятся очереди и таблицы, служащие для оценок влияющих характеристик.

Транзакты

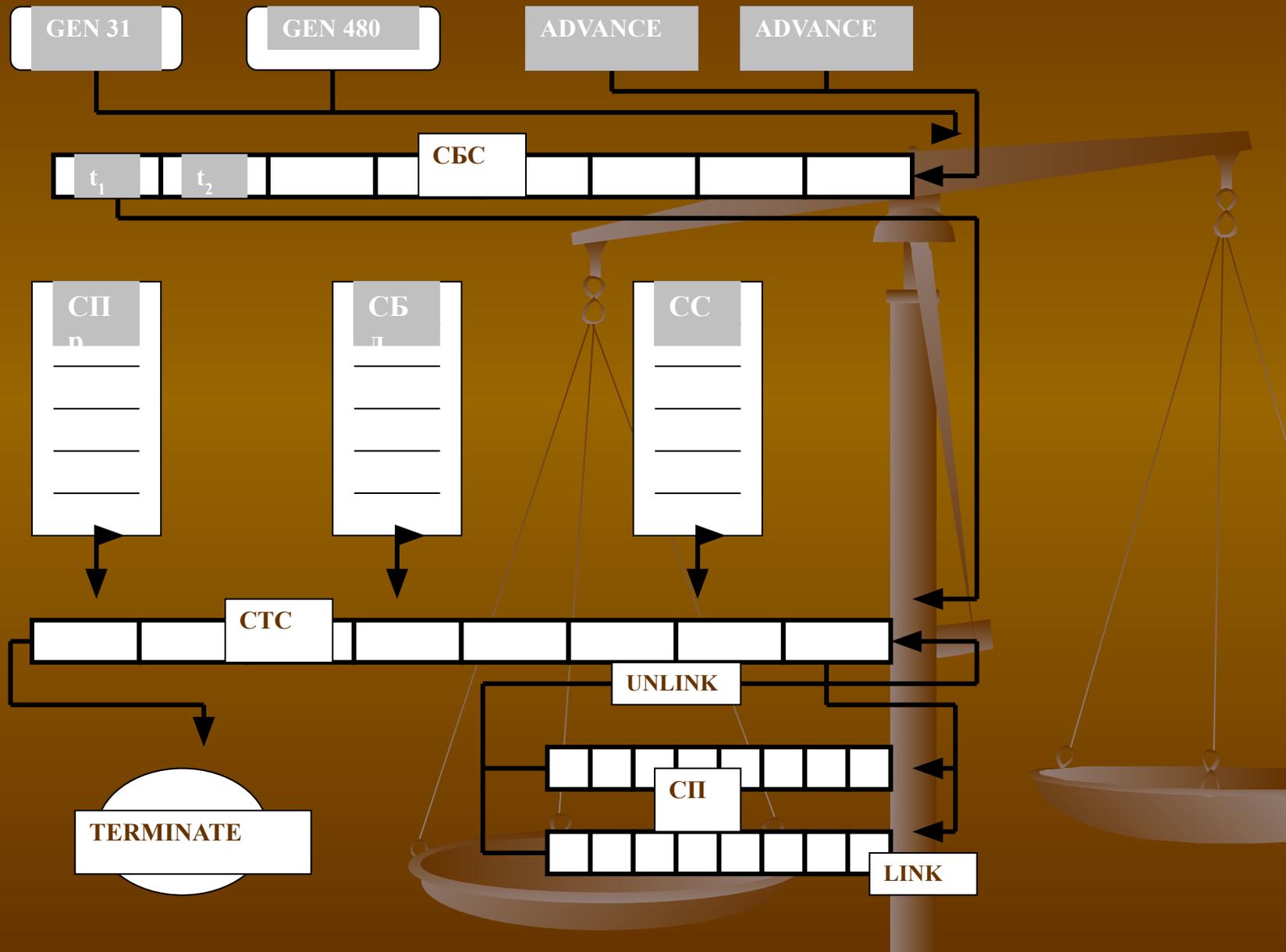
- **Транзакты** представляют собой описание динамических процессов в реальных системах. Они могут описываться как реальные физические объекты, так и нефизические (например, канальная программа).
- Транзакты можно генерировать и уничтожать в процессе моделирования.
- Основным атрибутом любого транзакта является число параметров. Изменится это число параметров может от 0 до 1020. Параметры обозначаются как P_x : номер параметра x + тип параметра. Может быть:
 - слово – W
 - полуслово – H
 - байт – B
 - плавающая точка – L
- Атрибутом любого транзакта является **уровень приоритета PR**. Изменяется от 0 до 100000.
- В одном задании может выполняться как один, так и несколько прогонов модели. При этом текущим значением абсолютного времени модели будет называться **суммарное время по всем реализованным прогонам**, а текущим значением относительного времени модели – **системное время в пределах одного прогона**. Время в течение которого транзакт обрабатывается в процессе моделирования называется **транзактным временем**. Оно отсчитывается:
 - с момента относительного времени;
 - с момента прохода транзакта через специальный блок MAP, до текущего момента относительного времени.



Классификация блоков GPSS

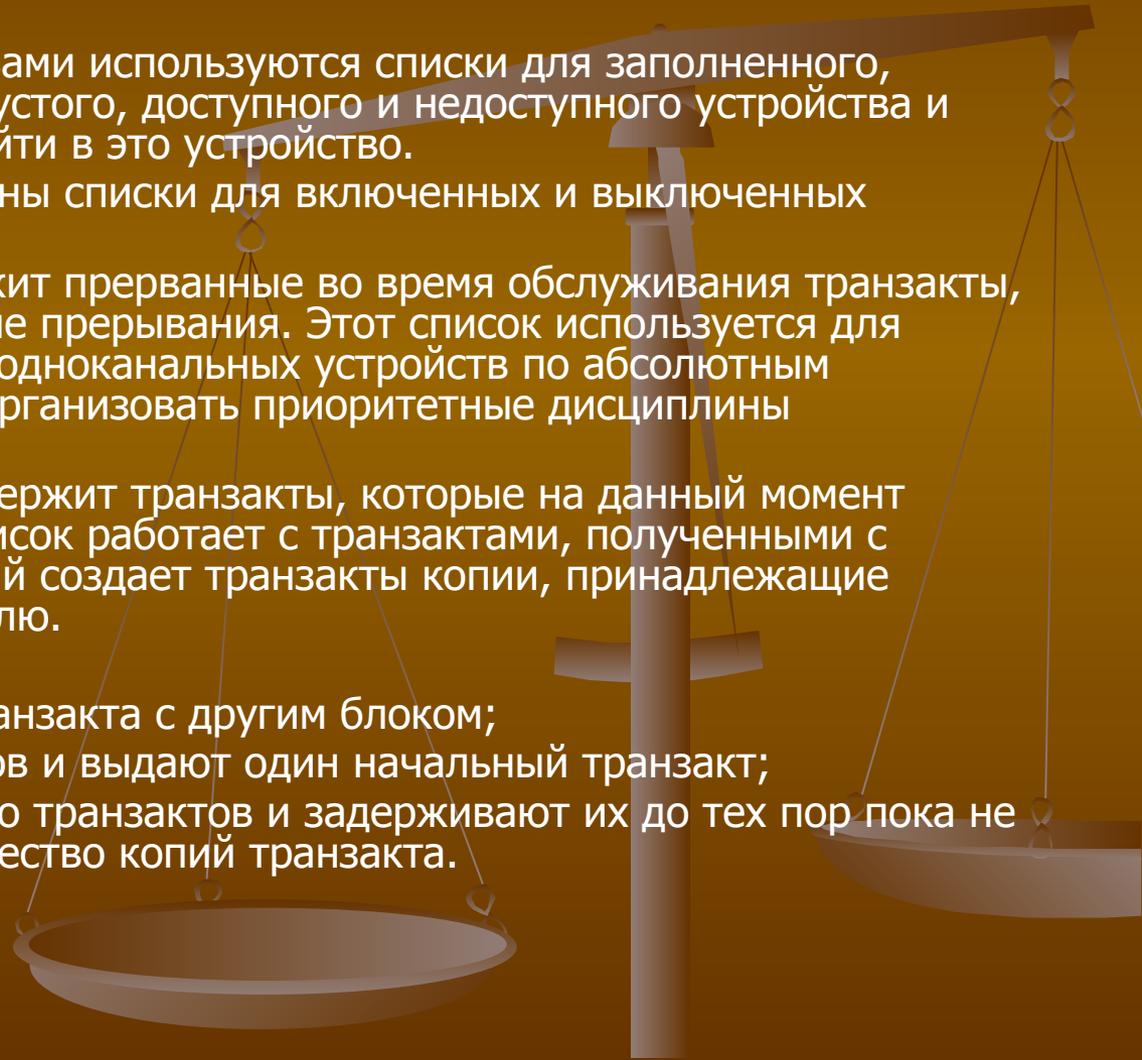
- W_n – *счетчик входов в блок* или *ожидающий счетчик*, который содержит в себе номер текущего транзакта, находящегося в блоке.
- N_n – *общий счетчик транзактов*, поступивших в блок с начального момента моделирования или с момента обнуления.
- **Блоки, осуществляющие модификацию атрибутов транзактов** (временная задержка, генерация и уничтожение транзактов, синхронизация движения нескольких транзактов, изменение параметров транзакции, изменение приоритетов).
- **Блоки, изменяющие последовательность передвижения транзактов** (т.е. блоки передачи управления).
- **Блоки, связывающие с группирующей категорией.**
- **Блоки, сохраняющие значения для дальнейшего использования.**
- **Блоки, организующие использование объектов аппаратной категории:**
 - Устройства: (парные команды) – тоже самое, но с приоритетной обработкой
 - Памяти;
 - Ключи.
- **Блоки, обеспечивающие получение статистической информации** (статистические таблицы).
- **Специальные блоки.**
- **Блоки для организации цепей.**
- **Вспомогательные блоки.**
- **<Нумерация><Метка> <Оператор> <Операнды><Комментарии>**

Управление процессом моделирования



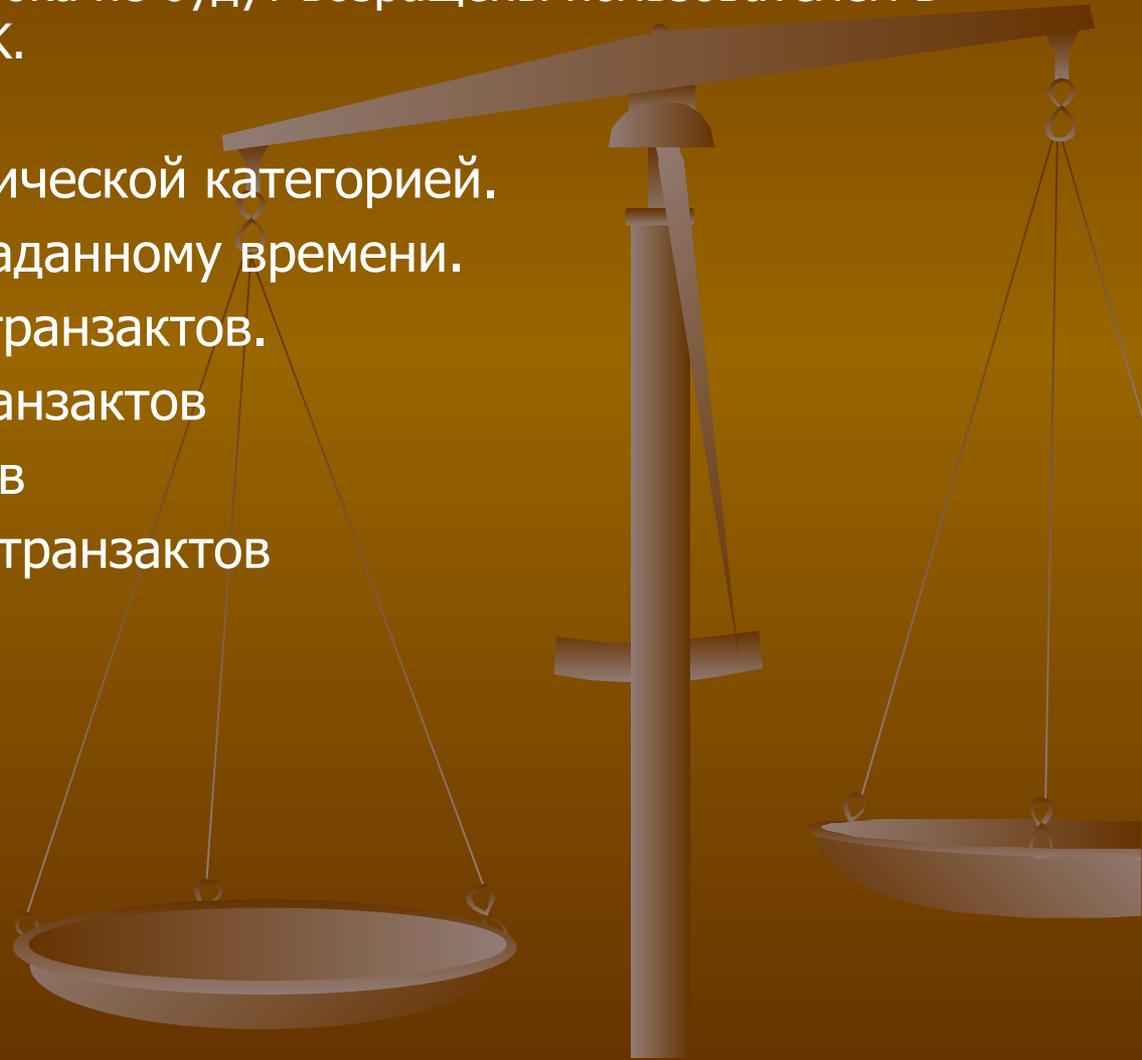
Управление процессом моделирования

- **Список блокировок** – это список транзактов, которые ожидают изменения состояния ресурса. Существует 6 видов связанных с устройствами, 7 видов связанных с многоканальными устройствами и 2 вида связанных с ключами.
- С устройствами используются списки для занятых и незанятых, доступных и недоступных устройств и устройств работающих без прерывания и с прерыванием.
- С многоканальными устройствами используются списки для заполненного, незаполненного, пустого, непустого, доступного и недоступного устройства и транзактов, которые могут войти в это устройство.
- С логическими ключами связаны списки для включенных и выключенных ключей.
- **Список прерываний** содержит прерванные во время обслуживания транзакты, а так же транзакты, вызвавшие прерывания. Этот список используется для организации и обслуживания одноканальных устройств по абсолютным приоритетам, что позволяет организовать приоритетные дисциплины обслуживания транзактов.
- **Список синхронизации** содержит транзакты, которые на данный момент времени сравнивают. Этот список работает с транзактами, полученными с помощью блока SPLIT, который создает транзакты копии, принадлежащие одному семейству или ансамблю.
- Блоки синхронизации:
 - синхронизируют движение транзакта с другим блоком;
 - собирают все копии транзактов и выдают один начальный транзакт;
 - собирают заданное количество транзактов и задерживают их до тех пор пока не соберется необходимое количество копий транзакта.



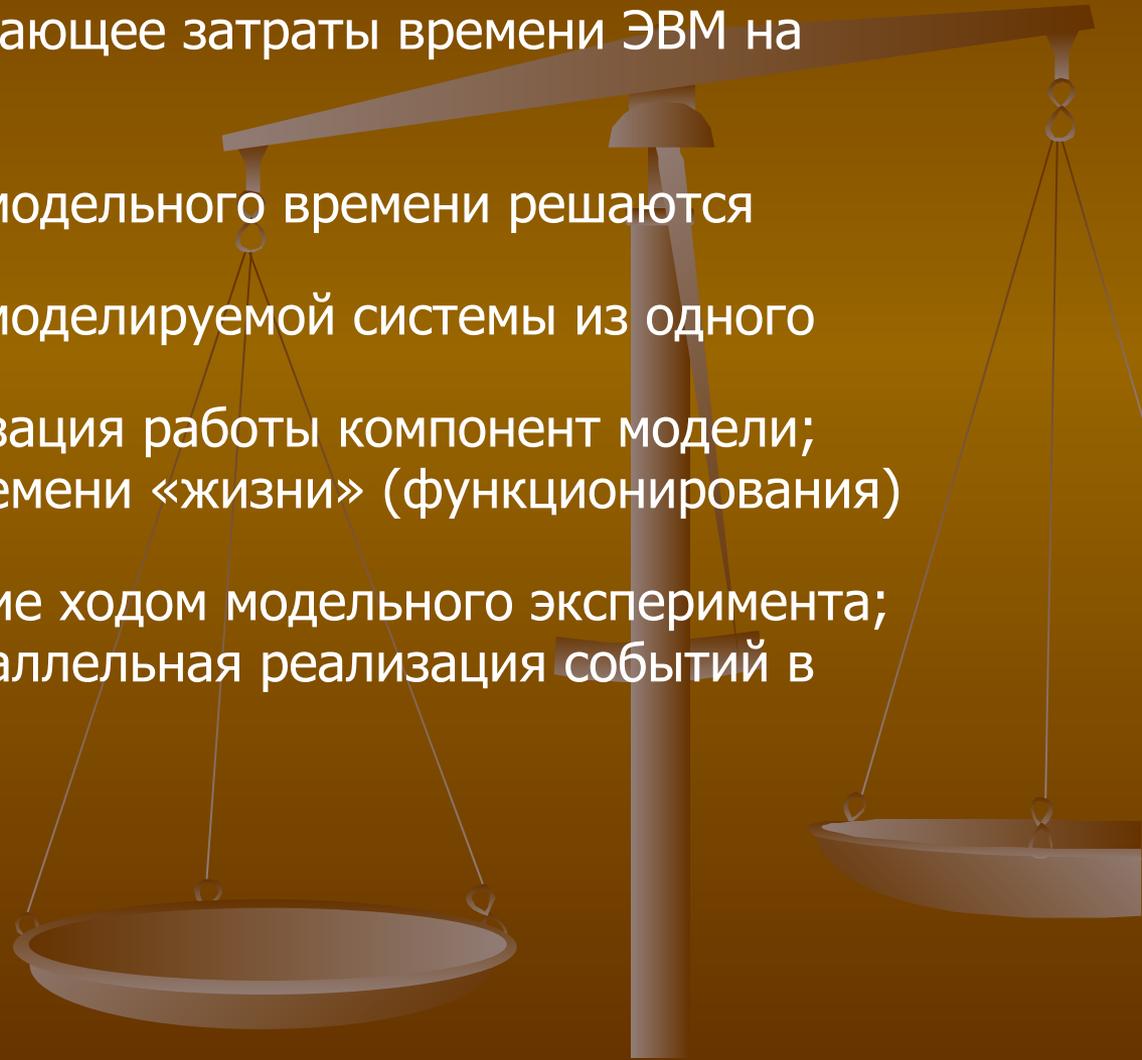
Управление процессом моделирования

- **Список пользователя** содержит транзакты, выведенные пользователем из СТС с помощью блока LINK и помещенные в список пользователя как временно неактивные. При работе симулятора они недоступны ему до тех пор, пока не будут возвращены пользователем в СТС с помощью блока UNLINK.
- Блоки, связанные с динамической категорией.
- Задержка транзактов по заданному времени.
- Создание и уничтожение транзактов.
- Изменение параметров транзактов
- Создание копий транзактов
- Синхронизация движения транзактов



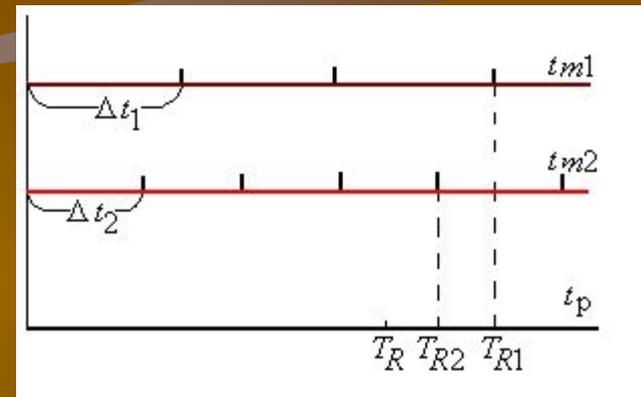
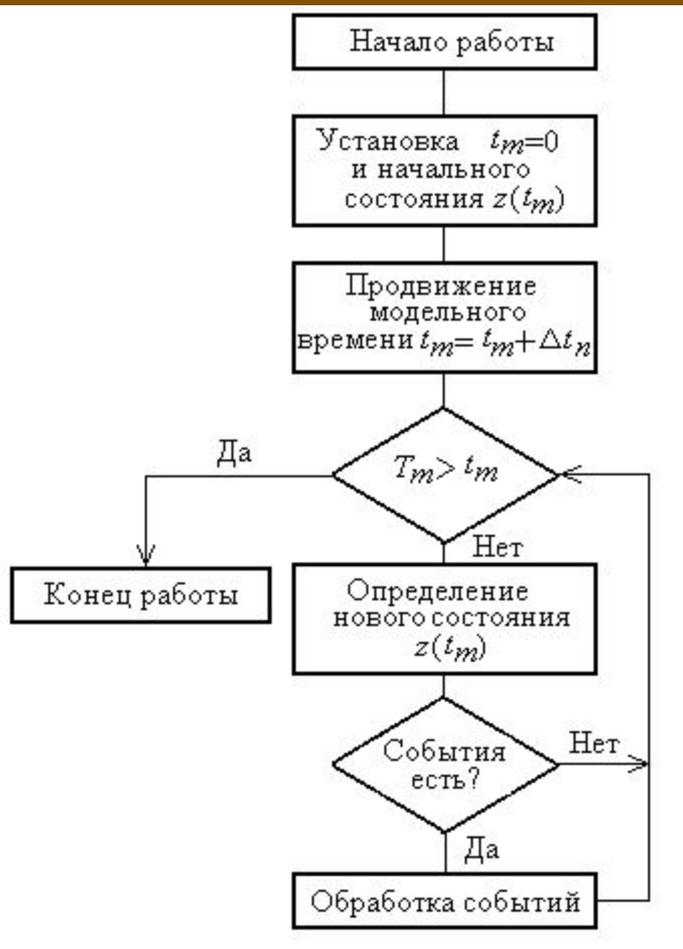
Управление модельным временем

- реальное время, в котором происходит функционирование имитируемой системы;
 - модельное (или, как его еще называют, системное) время, в масштабе которого организуется работа модели;
 - машинное время, отражающее затраты времени ЭВМ на проведение имитации.
- С помощью механизма модельного времени решаются следующие задачи:
- отображается переход моделируемой системы из одного состояния в другое;
 - производится синхронизация работы компонент модели;
 - изменяется масштаб времени «жизни» (функционирования) исследуемой системы;
 - производится управление ходом модельного эксперимента;
 - моделируется квазипараллельная реализация событий в модели.

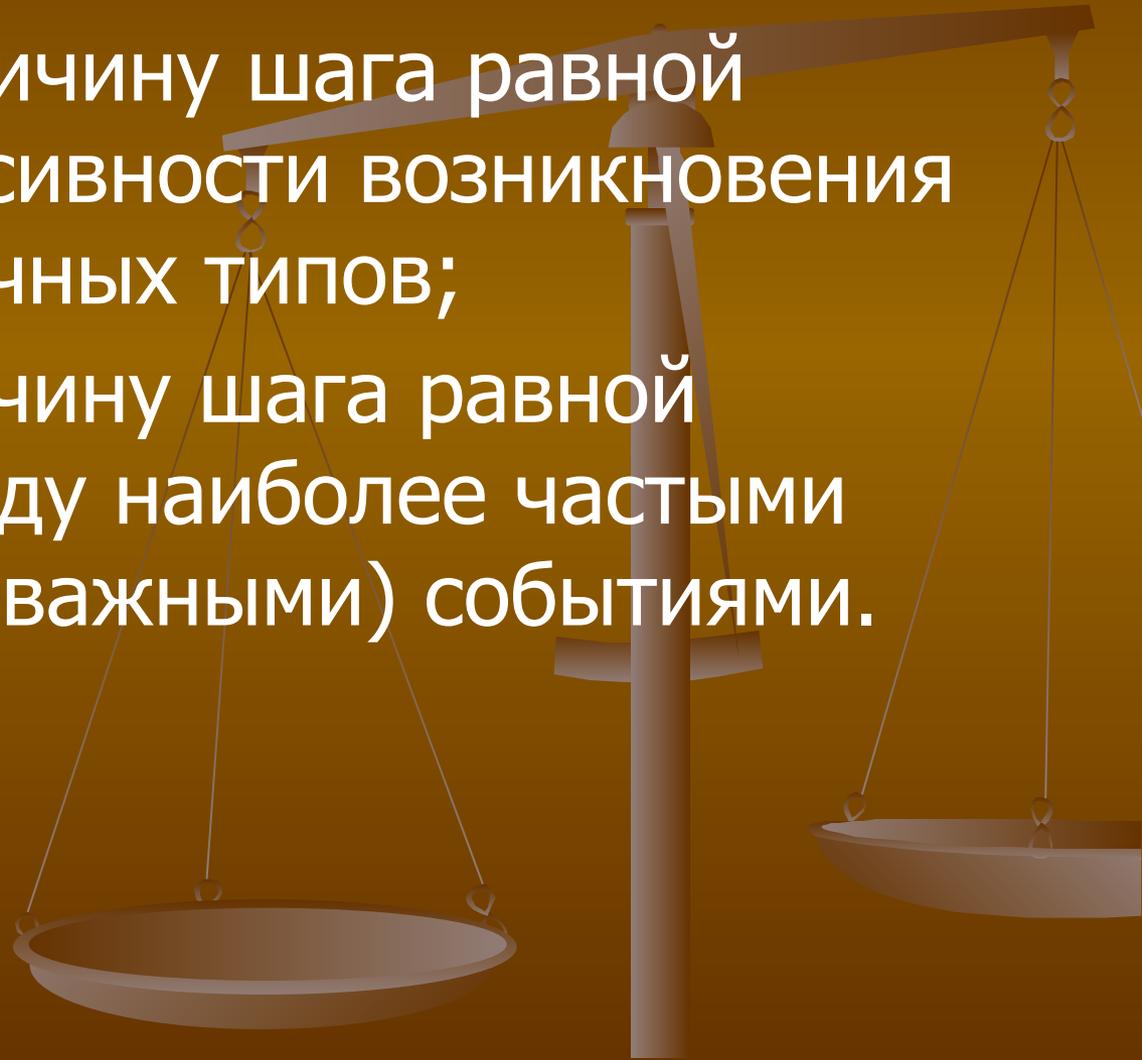


Метод постоянного шага

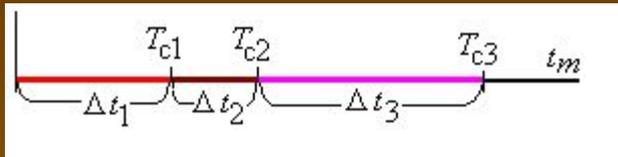
- Метод постоянного шага
- события появляются регулярно, их распределение во времени достаточно равномерно;
- число событий велико и моменты их появления близки;
- невозможно заранее определить моменты появления событий.



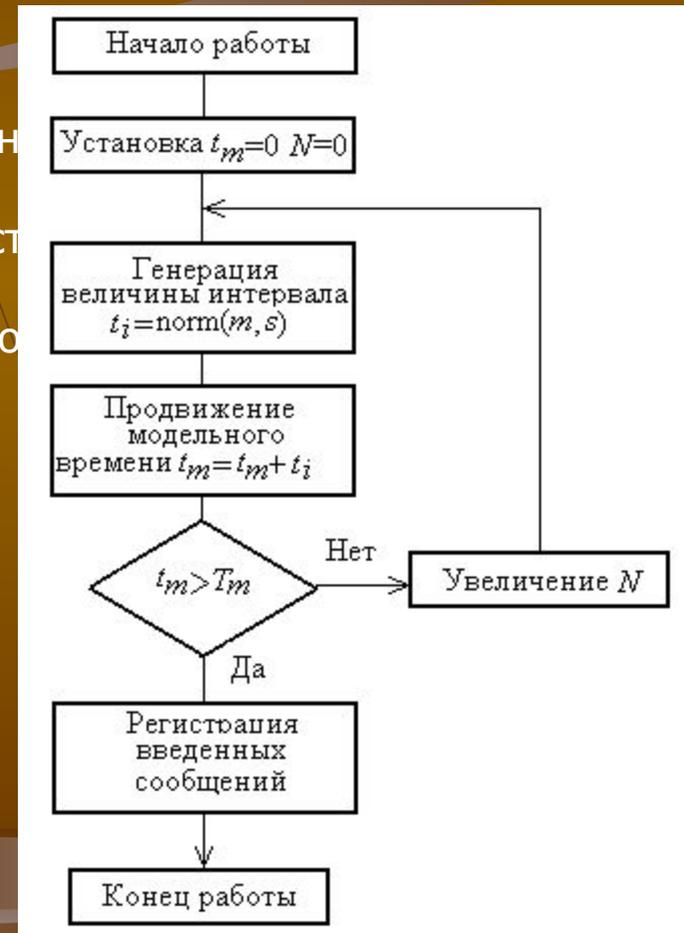
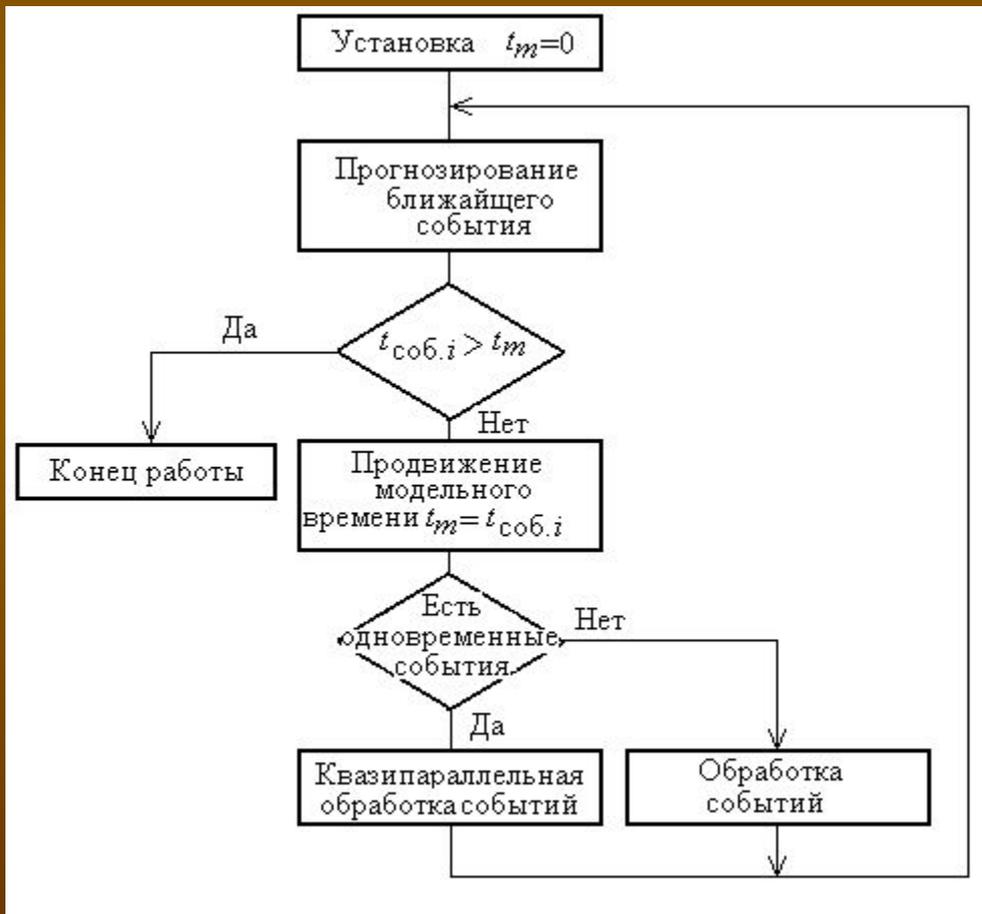
- Подходы для выбора шага моделирования:
- принимать величину шага равной средней интенсивности возникновения событий различных типов;
- выбирать величину шага равной интервалу между наиболее частыми (или наиболее важными) событиями.



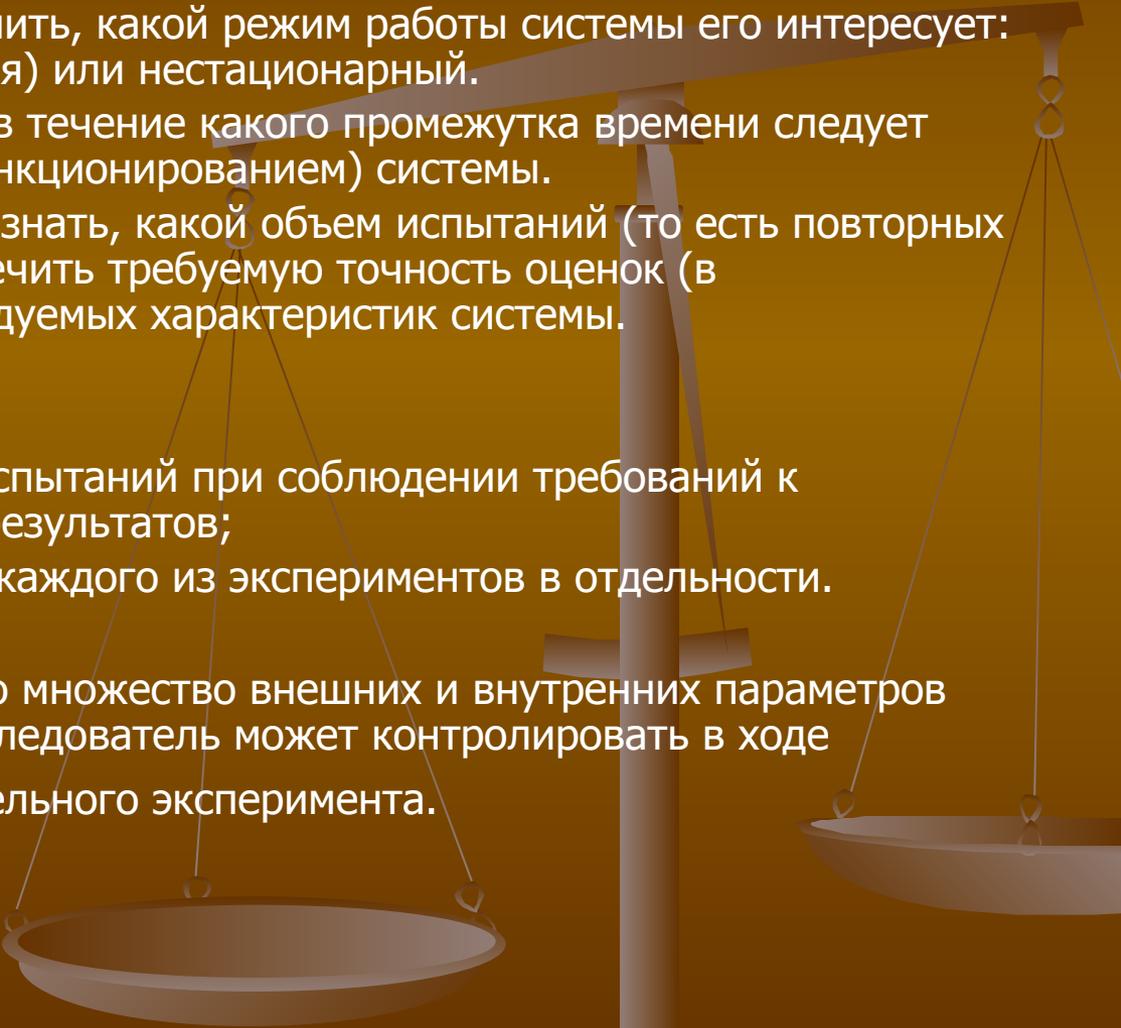
Изменение времени по особым состояниям



$$t_{m(i)} = t_{m(i-1)} + \text{norm}(m, s)$$



Планирование модельных экспериментов

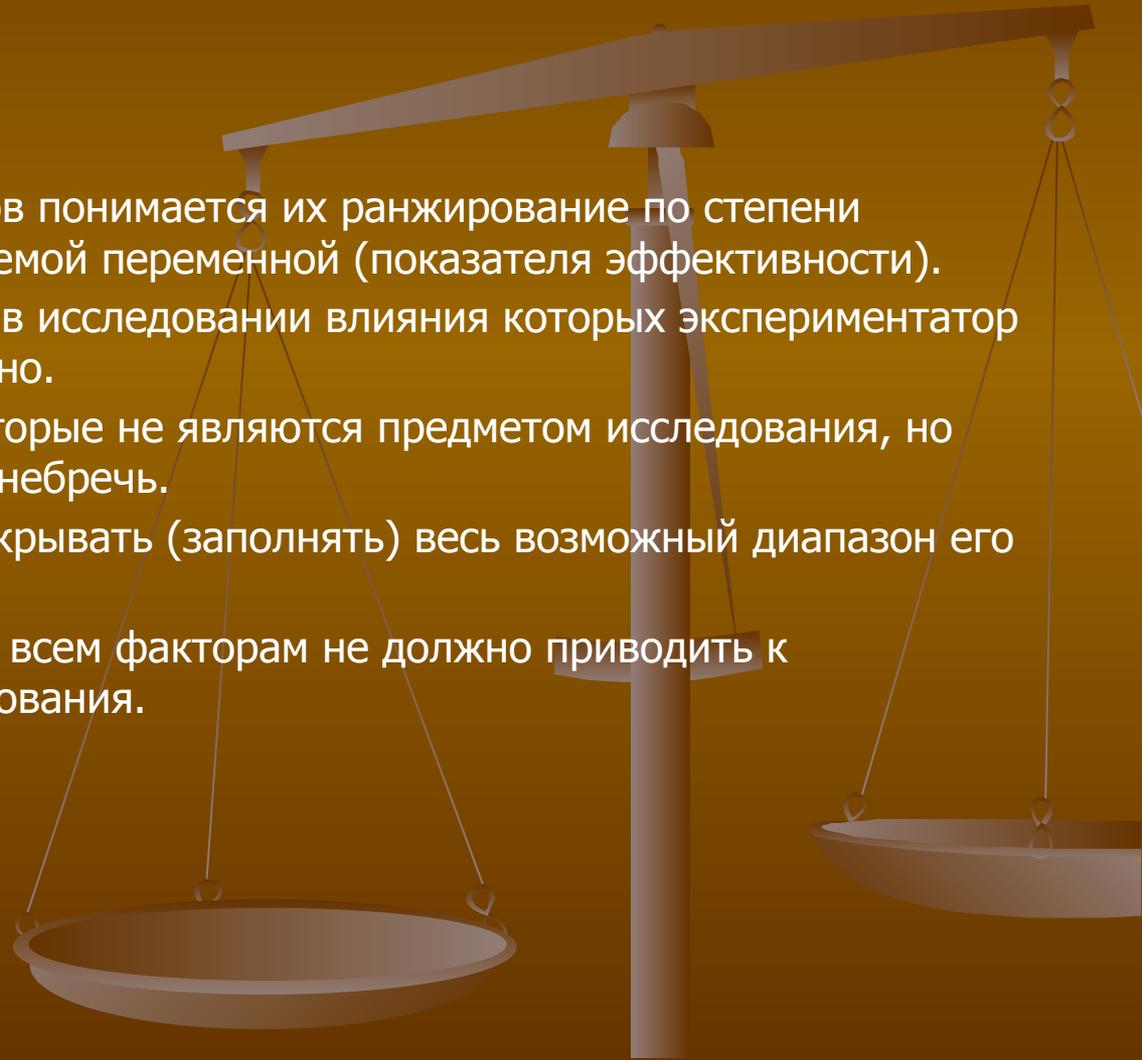
- Во-первых, исследователь и на этапе планирования эксперимента должен помнить, к какому классу относится моделируемая система (статическая или динамическая, детерминированная или стохастическая и т. д.).
 - Во-вторых, он должен определить, какой режим работы системы его интересует: стационарный (установившийся) или нестационарный.
 - В-третьих, необходимо знать, в течение какого промежутка времени следует наблюдать за поведением (функционированием) системы.
 - В-четвертых, хорошо было бы знать, какой объем испытаний (то есть повторных экспериментов) сможет обеспечить требуемую точность оценок (в статистическом смысле) исследуемых характеристик системы.
- цели:
- сокращение общего объема испытаний при соблюдении требований к достоверности и точности их результатов;
 - повышение информативности каждого из экспериментов в отдельности.
- Факторное пространство — это множество внешних и внутренних параметров модели, значения которых исследователь может контролировать в ходе подготовки и проведения модельного эксперимента.
- 

- **Центр плана.** Точка в факторном пространстве, соответствующая нулевым уровням всех факторов.
- **Интервал варьирования фактора.** Некоторое число J , прибавление которого к нулевому уровню дает верхний уровень, а вычитание — нижний.
- **Наблюдаемая переменная.** Выходной скалярный параметр Y относительно которого строится план эксперимента.
- Если моделирование используется как инструмент принятия решения, то в роли наблюдаемой переменной выступает **показатель эффективности.**

$$y = f(x) + \varepsilon$$

- **Дисперсия воспроизводимости эксперимента (Dy).** Характеризует качество эксперимента (точность измерений). Дисперсия Dy наблюдаемой переменной равна дисперсии ошибки опыта: $Dy = D\varepsilon$.
- Эксперимент называется идеальным при $Dy = 0$.
- задачи планирования имитационного эксперимента:
 - из всех допустимых требуется выбрать такой план, который позволил бы получить наиболее достоверное значение функции отклика $f(x)$ при фиксированном числе опытов;
 - из всех допустимых требуется выбрать такой план, при котором статистическая оценка функции отклика может быть получена с заданной точностью при минимальном объеме испытаний.

- Цель методов стратегического планирования имитационных экспериментов – получение максимального объема информации об исследуемой системе в каждом эксперименте (наблюдении).
- задачи:
 - идентификация факторов;
 - выбор уровней факторов.
- Под идентификацией факторов понимается их ранжирование по степени влияния назначение наблюдаемой переменной (показателя эффективности).
- Первичные – это те факторы, в исследовании влияния которых экспериментатор заинтересован непосредственно.
- Вторичные – это факторы, которые не являются предметом исследования, но влиянием которых нельзя пренебречь.
- уровни фактора должны перекрывать (заполнять) весь возможный диапазон его изменения;
- общее количество уровней по всем факторам не должно приводить к чрезмерному объему моделирования.



Способы построения стратегического плана

- Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется полным факторным экспериментом (ПФЭ).

$$N = l_1 \cdot l_2 \cdot l_3 \dots l_k \quad N = L \cdot k$$

- Использование ПФЭ целесообразно только в том случае, если в ходе имитационного эксперимента исследуется взаимное влияние всех факторов, фигурирующих в модели.
- частичный факторный эксперимент(ЧФЭ).
- Рандомизированный план — предполагает выбор сочетания уровней для каждого прогона случайным образом.
- Латинский план (или «латинский квадрат») — используется в том случае, когда проводится эксперимент с одним первичным фактором и несколькими вторичными

Значение фактора В	Значение фактора С			
	С ₁	С ₂	С ₃	С ₄
В ₁	А ₁	А ₂	А ₃	А ₄
В ₂	А ₂	А ₃	А ₄	А ₁
В ₃	А ₃	А ₄	А ₁	А ₂
В ₄	А ₄	А ₁	А ₂	А ₃

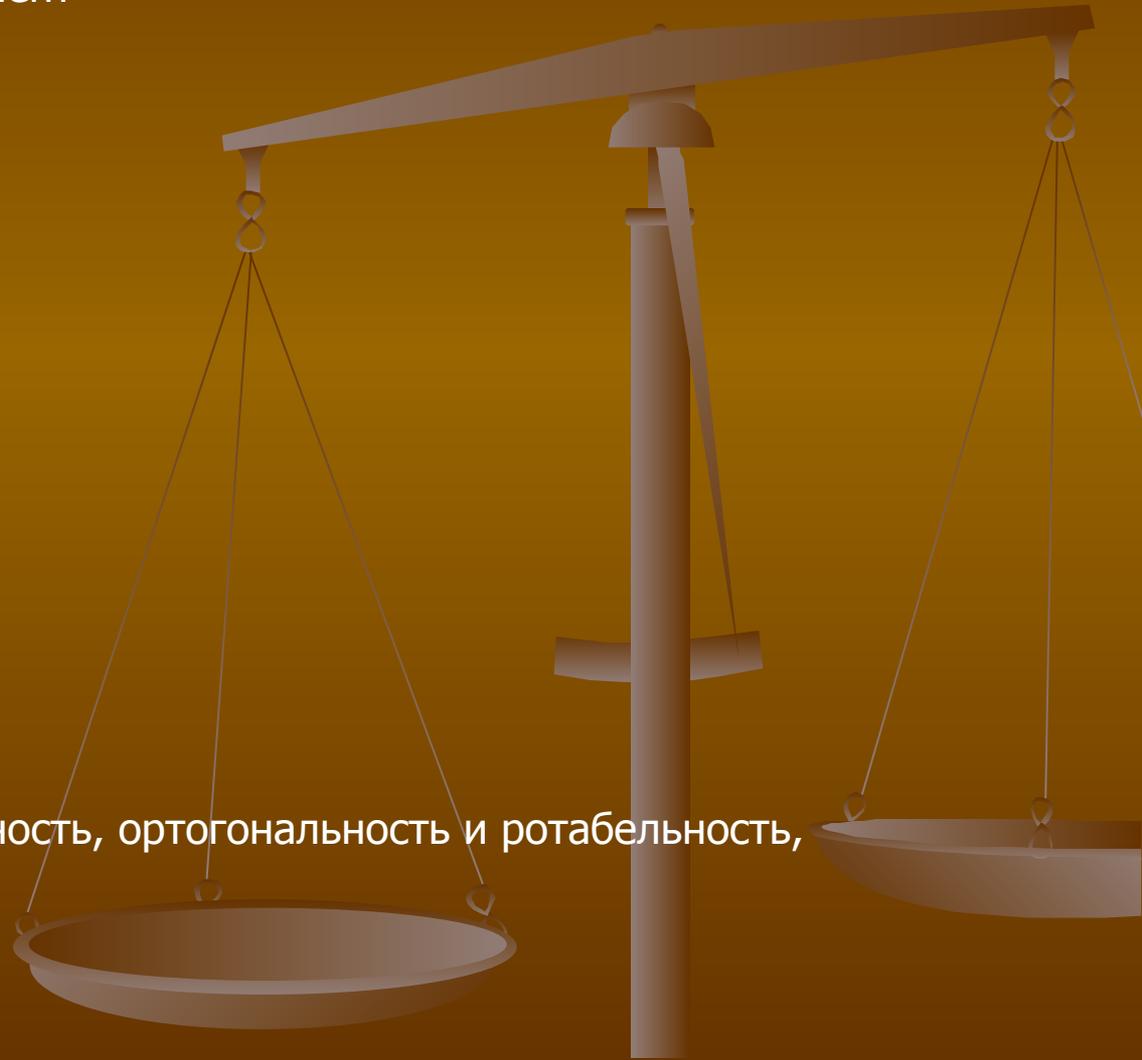
- Эксперимент с изменением факторов по одному
- $N = I_1 + I_2 + \dots + I_n$
- Дробный факторный эксперимент
- $N = 2^k$

Номер эксперимента	Значения факторов	
	x_1	x_2
1	0	0
2	0	1
3	1	0
4	1	1

Матрица планов для $k=3$:

Номер эксперимента	Значения факторов		
	x_1	x_2	x_3
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	1	0
4	0	1	1
5	1	0	0
6	1	0	1
7	1	1	0
8	1	1	1

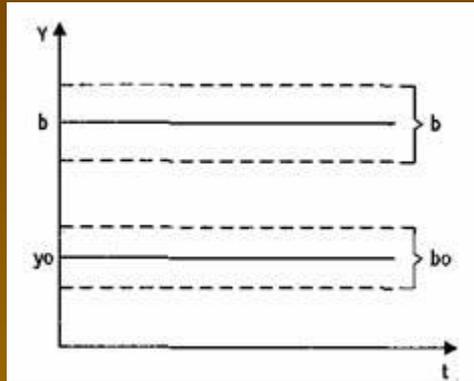
- симметричность, нормированность, ортогональность и ротабельность,



Тактическое планирование эксперимента

Совокупность методов установления необходимого объема испытаний относят к тактическому планированию экспериментов.

Формирование простой случайной выборки



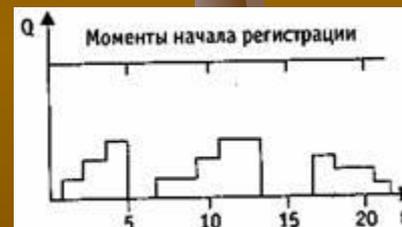
- вид распределения наблюдаемой переменной y
- коррелированность между собой элементов выборки;
- наличие и длительность переходного режима функционирования моделируемой системы.
- $N_c \times n_t$
- $y \pm b$

$$n_t = \frac{Z^2 \cdot D_y}{b^2}$$



Методы понижения дисперсии

- активные (предусматривают формирование выборки специальным образом);
- пассивные (применяются после того, как выборка уже сформирована);
- косвенные (в которых для получения оценок наблюдаемой переменной используются значения некоторых вспомогательных величин).
- Методы уменьшения ошибок
 - значительное увеличение длительности прогона;
 - исключение из рассмотрения переходного периода;
 - инициализация модели при некоторых специально выбранных начальных условиях.
- Способы снижения переходного периода
 - методом повторения;
 - методом подинтервалов;
 - методом циклов;
 - метод стратифицированной выборки.
- **Метод повторения.** Каждое наблюдение получается при помощи отдельного прогона модели, причем все прогоны начинаются при одних и тех же начальных условиях, но используются различные последовательности случайных чисел.
- **Методом подинтервалов.** Производится разбиение каждого прогона модели на равные промежутки времени. Начало каждого интервала совпадает с началом очередного этапа наблюдений.



- **Метод циклов.** При использовании метода циклов влияние автокорреляции уменьшается за счет выбора интервалов таким образом, чтобы в их начальных точках условия были одинаковыми.
- **Метод стратифицированной выборки.** Выборка разделяется на части, называемые слоями (стратами). При этом необходимо, чтобы значения элементов выборки как можно меньше различались внутри одного слоя и как можно больше – между различными слоями. Внутри каждого слоя производят случайный отбор элементов и вычисляют среднее значение слоя y_i .

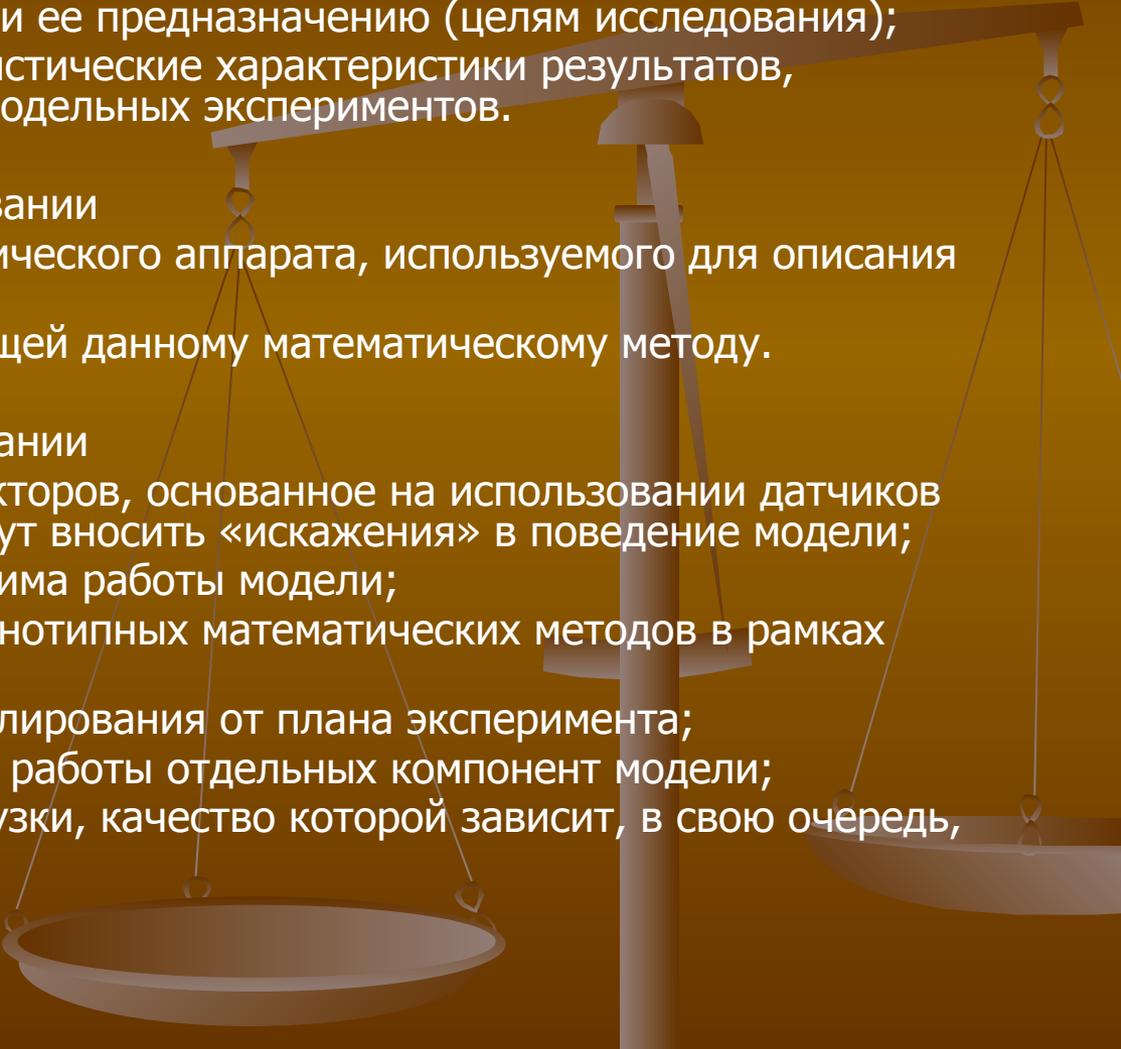
$$y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k N_i \cdot y_i$$

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k N_i \cdot D_{y_i}$$



- Косвенные методы понижения дисперсии основаны на том, что зачастую некоторые из выходных характеристик модели получить (вычислить) легче, чем другие. Их использование для дальнейших расчетов предполагает не только весьма глубокое знание сущности процессов, протекающих в системе, но и наличие формального описания взаимной зависимости параметров модели.

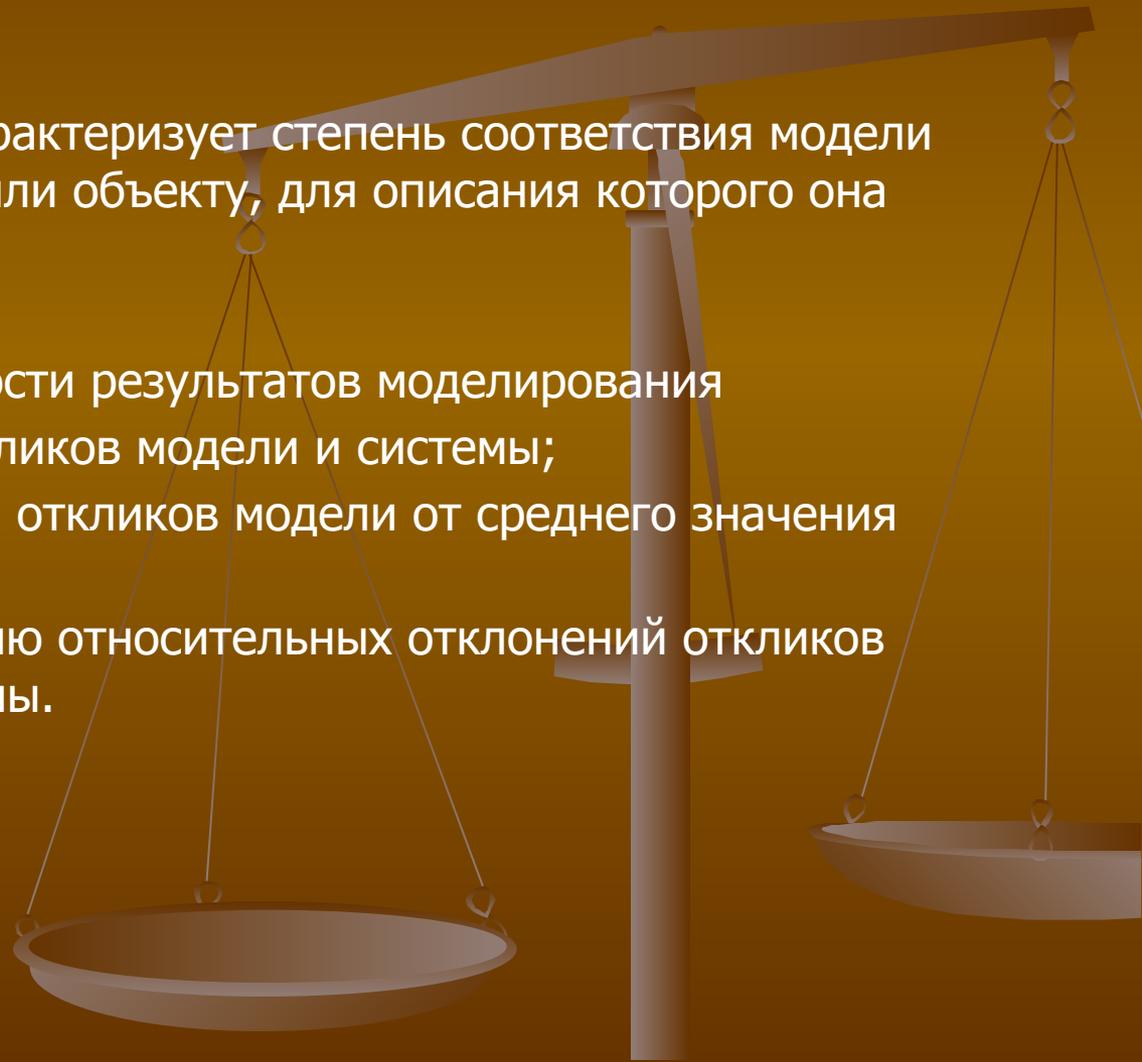
Обработка и анализ моделирования

- полученные результаты обладают требуемой точностью и достоверностью;
 - исследователь способен правильно интерпретировать полученные результаты и знает, каким образом они могут быть использованы.
 - Оценка качества имитационной модели
 - проверить соответствие модели ее предназначению (целям исследования);
 - оценить достоверность и статистические характеристики результатов, получаемых при проведении модельных экспериментов.
- При аналитическом моделировании
- корректным выбором математического аппарата, используемого для описания исследуемой системы;
 - методической ошибкой, присущей данному математическому методу.
- При имитационном моделировании
- моделирование случайных факторов, основанное на использовании датчиков случайных чисел, которые могут вносить «искажения» в поведение модели;
 - наличие нестационарного режима работы модели;
 - использование нескольких разнотипных математических методов в рамках одной модели;
 - зависимость результатов моделирования от плана эксперимента;
 - необходимость синхронизации работы отдельных компонент модели;
 - наличие модели рабочей нагрузки, качество которой зависит, в свою очередь, от тех же факторов.
- 

- Целевые свойства модели
- адекватность;
- устойчивость;
- чувствительность.

- Оценка **адекватности** характеризует степень соответствия модели тому реальному явлению или объекту, для описания которого она строится.

- Способы оценки адекватности результатов моделирования
- по средним значениям откликов модели и системы;
- по дисперсиям отклонений откликов модели от среднего значения откликов системы;
- по максимальному значению относительных отклонений откликов модели от откликов системы.



- Проверяется близость среднего значения наблюдаемой переменной Y среднему значению отклика реальной системы y^*
- В результате n опытов на реальной модели получают множество значений (выборку) y^*
- Выполнив m экспериментов на модели получают множество значений наблюдаемой переменной Y
- Затем вычисляются оценки математического ожидания и дисперсии откликов модели и системы, после чего выдвигается гипотеза о близости средних значений величин Y^* и Y (в статистическом смысле).
- Основой для проверки гипотезы является t -статистика (распределение Стьюдента). Ее значение, вычисленное по результатам испытаний, сравнивается с критическим значением $t_{кр}$ взятым из справочной таблицы. Если выполняется неравенство $t_n < t_{кр}$, то гипотеза принимается.

Устойчивость модели — это ее способность сохранять адекватность при исследовании эффективности системы на всем возможном диапазоне рабочей нагрузки, а также при внесении изменений в конфигурацию системы.

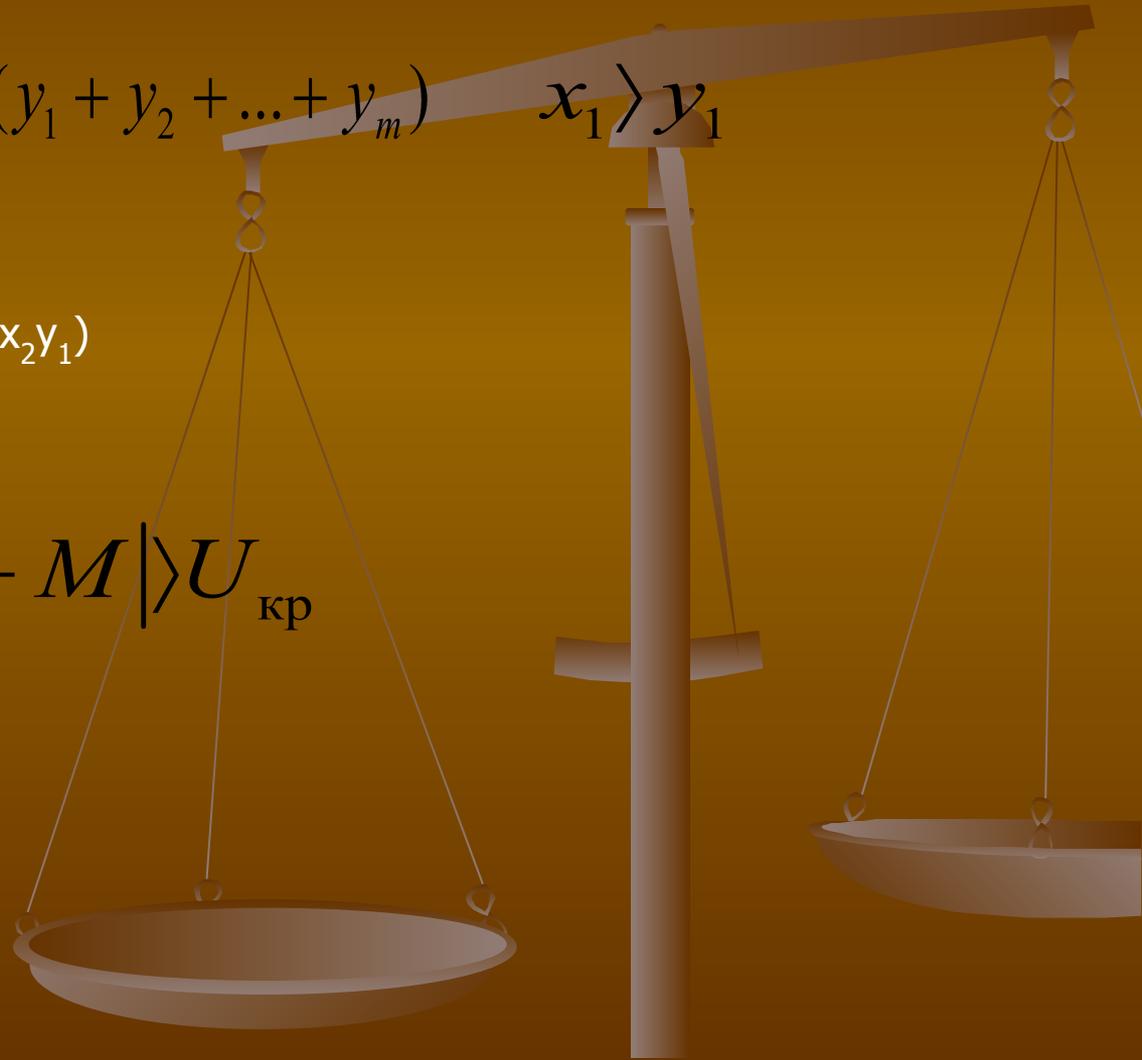
чем ближе структура модели структуре системы и чем выше степень детализации, тем устойчивее модель.

- При статистической оценке устойчивости модели соответствующая гипотеза может быть сформулирована следующим образом: при изменении входной (рабочей) нагрузки или структуры ИМ закон распределения результатов моделирования остается неизменным.

$$x = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad y = (y_1 + y_2 + \dots + y_m) \quad x_1 > y_1$$

- $n=m=3$
- $y_1, x_1, y_3, x_2, y_2, x_3$
- $(x_1 y_1), (x_3 y_1), (x_3 y_2), (x_3 y_1), (x_2 y_3), (x_2 y_1)$

$$|U - M| > U_{кр}$$



Оценка чувствительности

- Вычисляется величина относительного среднего приращения параметра x :

$$\Delta x = \frac{(x_{\max} - x_{\min})^2}{(x_{\max} + x_{\min})} \cdot 100\%$$

- Проводится пара модельных экспериментов при значениях

$$x = x_{\max} \quad x = x_{\min}$$

$$y_1 = f(x_{\min}) \quad y_2 = f(x_{\min})$$

- Вычисляется относительное приращение наблюдаемой переменной y

$$\Delta y = \frac{|y_1 - y_2|^2}{y_1 + y_2} \cdot 100\%$$

- Для k -го параметра модели получают пару значений $\{\Delta x_k, \Delta y_k\}$ характеризующие чувствительность модели по этому параметру

Калибровка модели

- Если в результате проведенной оценки качества модели оказалось, что ее целевые свойства не удовлетворяют разработчика то выполняется калибровка. Процесс калибровки носит итеративный характер и состоит из трех основных этапов:
- глобальные изменения модели (например, введение новых процессов, изменение типов событий и т. д.);
- локальные изменения (в частности, изменение некоторых законов распределения моделируемых случайных величин);
- изменение специальных параметров, называемых калибровочными.



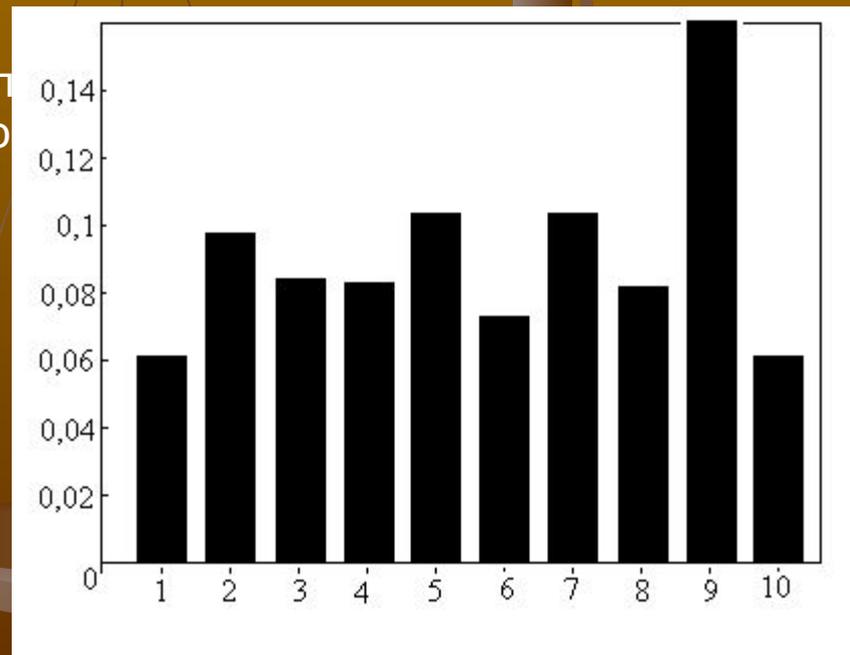
- сравнение выходных распределений. Цель – оценка адекватности и т.д.
- Балансировка модели. Основная задача – оценка устойчивости и чувствительности модели.
- Оптимизация модели. Цель этого этапа – обеспечение требуемой точности результатов.
- дополнительная проверка качества датчиков случайных чисел;
- снижение влияния переходного режима;
- применение специальных методов понижения дисперсии.

Подбор параметров распределений

- Статистическая гипотеза – это утверждение относительно значений одного или более параметров распределения некоторой величины или о самой форме распределения
- Выбираются две исходных гипотезы: основная H_0 и альтернативная ей H_1
- Статистическая проверка гипотезы – это процедура выяснения, следует ли принять основную гипотезу H_0 или отвергнуть ее

$$P(z \in B | H_0) \leq \alpha$$

- Производится выборка (эксперимент) на основании чего вычисляется z-частичное значение критерия Z
- Если $z \in B$
- то от гипотезы H_0 отказываются, если полученные наблюдения не противостоят



Методика построения гистограммы относительных частот

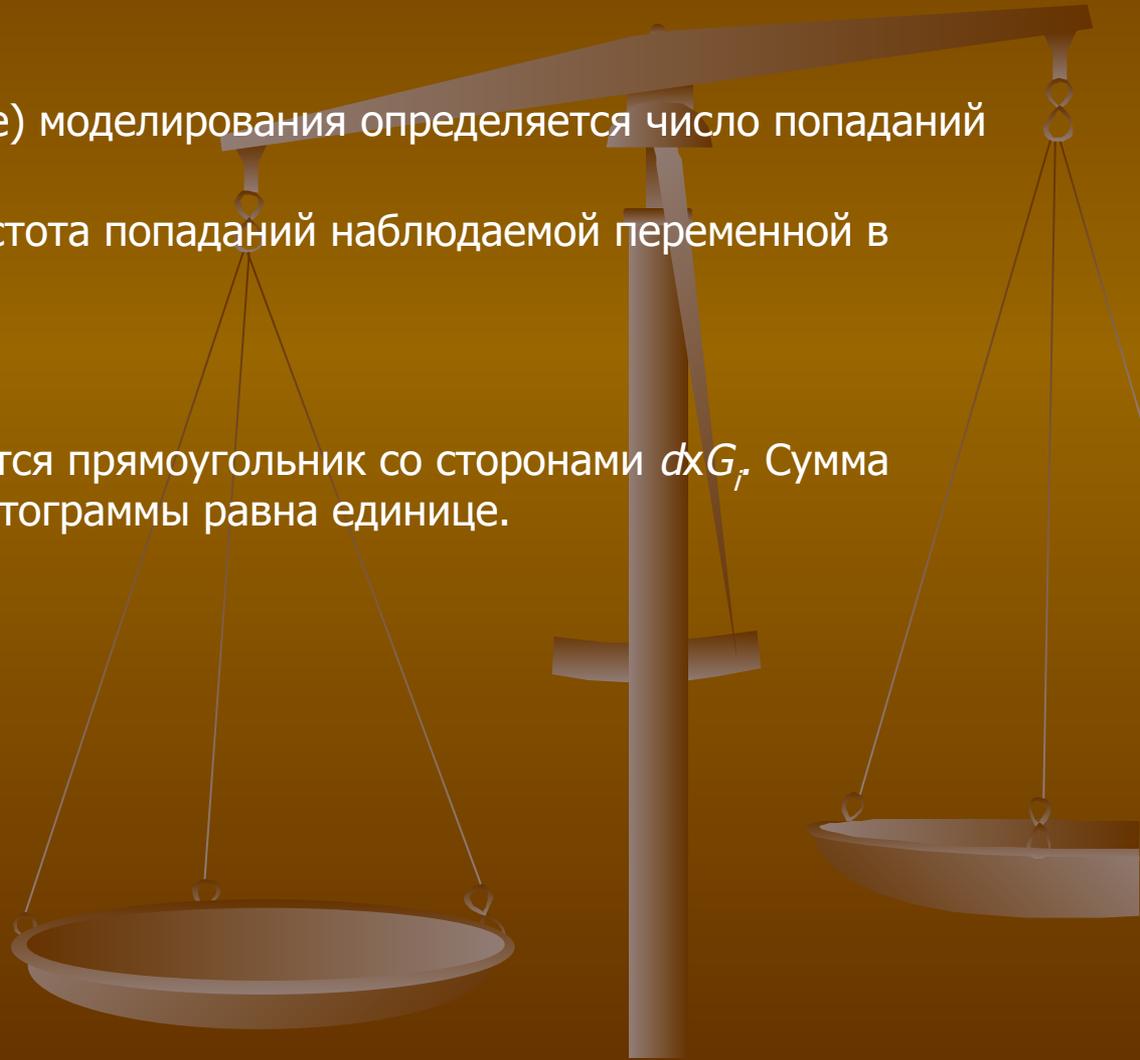
- Вычисляется величина интервала гистограммы

$$d = (y_{\max} - y_{\min}) / n$$

- По результатам (или в процессе) моделирования определяется число попаданий значений y в i -й интервал.
- Вычисляется относительная частота попаданий наблюдаемой переменной в каждый интервал

$$G_i = R_i / N$$

- На каждом i -м интервале строится прямоугольник со сторонами dxG_i . Сумма площадей прямоугольников гистограммы равна единице.



- **T – критерий**

- Служит для проверки гипотезы о равенстве средних значений двух нормально распределенных случайных величин x и y в предположении, что дисперсии их равны (хотя и неизвестны).

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{(n_1 - 1)D_x + (n_2 - 1)D_y}} \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}$$

- Критическое значение для T-критерия, который подчиняется T-распределению Стьюдента, определяется по таблице для выбранного значения вероятности ошибки 1-го рода и числа степеней свободы $k = n_1 + n_2 - 2$

- **F - критерий**

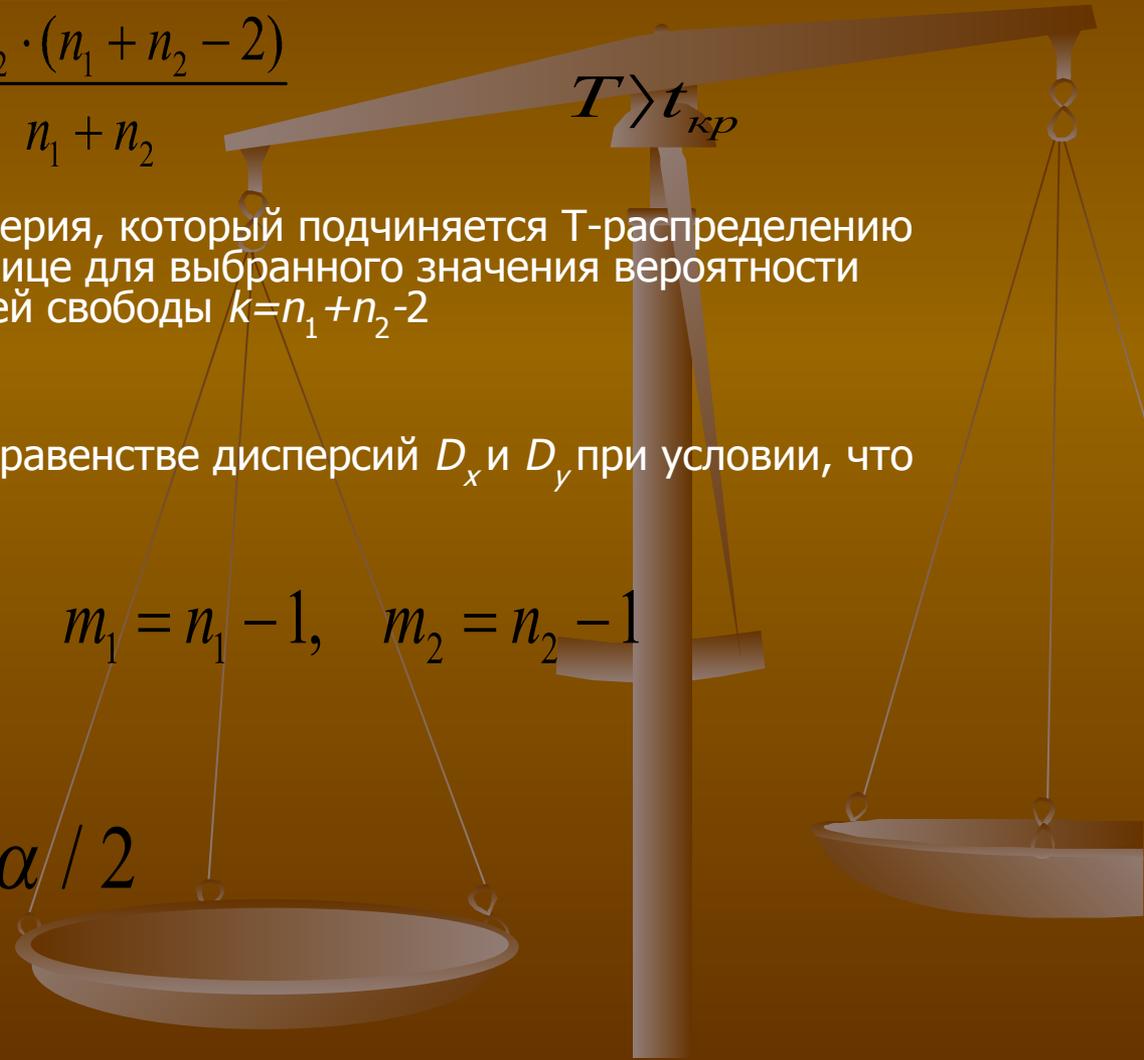
- Служит для проверки гипотезы о равенстве дисперсий D_x и D_y при условии, что x и y распределены нормально.

$$F = D_x / D_y$$

$$m_1 = n_1 - 1, \quad m_2 = n_2 - 1$$

$$a = \alpha / 2$$

$$T > t_{кр}$$



■ Критерии согласия

- Используются для проверки того, удовлетворяет ли рассматриваемая случайная величина данному закону распределения.

- Критерий согласия Пирсона (χ^2)

- $F_y(y) = F_0(y),$

- Область значений случайной величины y разбивается (произвольно) на k непересекающихся множеств («классов»).

- В результате n опытов формируется выборка (y_1, \dots, y_n) .

- Вычисляется контрольная величина χ^2 :

$$\chi^2 = \left(\sum_{i=1}^k \frac{M_i^2}{n \cdot p_i} \right) - n$$

- Здесь M_i^2 – число значений y , попавших в i -й класс; p_i – теоретическая вероятность для $F_0(y)$ попадания значения y в i -й класс.

- 4. По таблице χ^2 -распределений находят критическое значение χ^2_α для уровня значимости α и $m = k - 1$ степеней свободы. Если, $\chi^2 \geq \chi^2_\alpha$ то гипотеза отвергается.

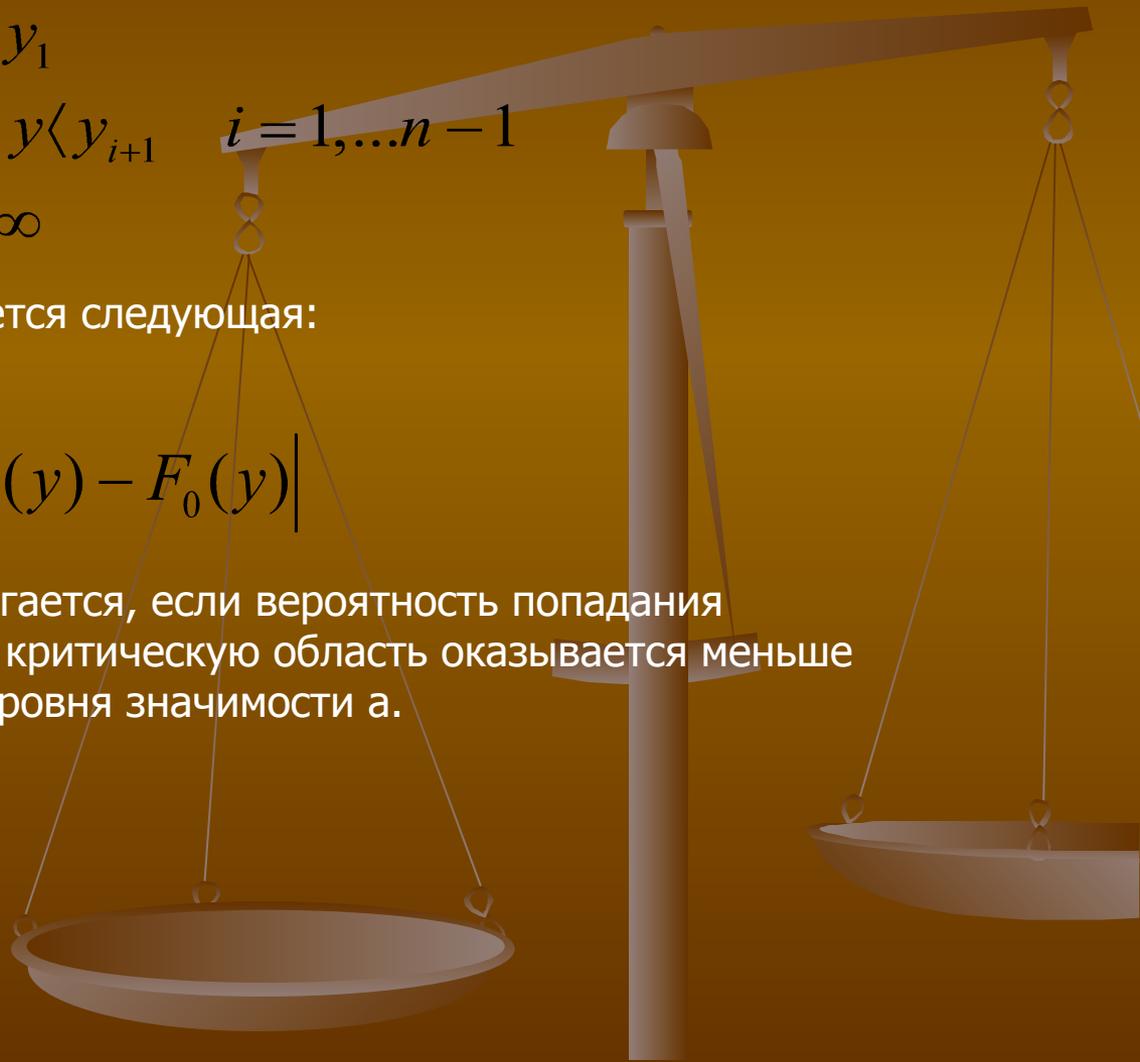
- Критерий Колмагорова-Смирнова
- Имеющуюся выборку $(y_1 \dots y_n)$ упорядочивают по возрастанию и строят следующую эмпирическую функцию распределения:

$$F_y(y) = \begin{cases} 0, & -\infty < y < y_1 \\ i / n, & y_1 \leq y < y_{i+1} \quad i = 1, \dots, n-1 \\ 1, & y_n \leq y < \infty \end{cases}$$

Контрольной величиной является следующая:

$$D_y = \max |F_y(y) - F_0(y)|$$

Гипотеза $H_0: F_y(y) = F_0(y)$ отвергается, если вероятность попадания соответствующего критерия в критическую область оказывается меньше выбранного исследователем уровня значимости α .



Оценка влияния и взаимосвязи факторов

- Отыскание аналитических зависимостей, связывающих между собой различные параметры, фигурирующие в модели, может быть основано на совместном использовании группы методов математической статистики: дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа
- **Однофакторный дисперсионный анализ**
- Суть однофакторного дисперсионного анализа сводится к определению влияния на результат моделирования одного выбранного фактора.
- формально постановка задачи однофакторного дисперсионного анализа состоит в следующем:
 - Пусть интересующий нас фактор x имеет I уровней. Для каждого из них получена выборка значений наблюдаемой переменной n , где n — объем выборки (число наблюдений).
 - Необходимо проверить гипотезу H_0 о равенстве средних значений выборок (то есть о независимости значений y от значений исследуемого фактора x).
 - Уравнение однофакторного дисперсионного анализа имеет вид:

$$y_{ij} = m + a_i + e_{ij}$$

- Здесь y_{ij} — j -е значение y в i -й серии опытов; m — генеральное среднее случайной величины y (то есть среднее значение наблюдаемой переменной, обусловленное ее «сущностью»); a_i — неизвестный параметр, отражающий влияние фактора x («эффект» i -го значения фактора x); e_{ij} — ошибка измерения y .

Оценка влияния и взаимосвязи факторов

- Для проверки гипотезы H_0 используют F-критерий и переходят от проверки значимости различий средних к проверке значимости различий двух дисперсий:
- генеральной (обусловленной погрешностями измерений) — D_0 ;
- факторной (обусловленной изменением фактора x) — D_x .
- Значение F-критерия вычисляется как отношение D_x/D_0 или D_0/D_x (в числителе должна стоять большая из дисперсий);
- по таблице F-распределений находят его критическое значение $F_{кр}$ для заданного уровня значимости и числа степеней свободы $m_1=n-1$, $m_2=l-1$.
- Если $F > F_{кр}$, то гипотезу H_0 отвергают, то есть различия являются значимыми (фактор x влияет на значения y).

Многофакторный дисперсионный анализ

- Многофакторный дисперсионный анализ позволяет оценивать влияние на наблюдаемую переменную уже не одного, а произвольного числа факторов.
- Для одного первичного и двух вторичных факторов a, b, c , имеющих n уровней каждый, уравнение дисперсионного анализа :

$$y_{ijk} = m + a_i + b_j + c_k + e_{ijk}$$

- Решение задачи дисперсионного анализа заключается в проверке гипотез о независимости результатов измерений от факторов a, b, c :

$$H_a : a_i = 0, i = 1, n$$

$$H_b : b_j = 0, j = 1, n$$

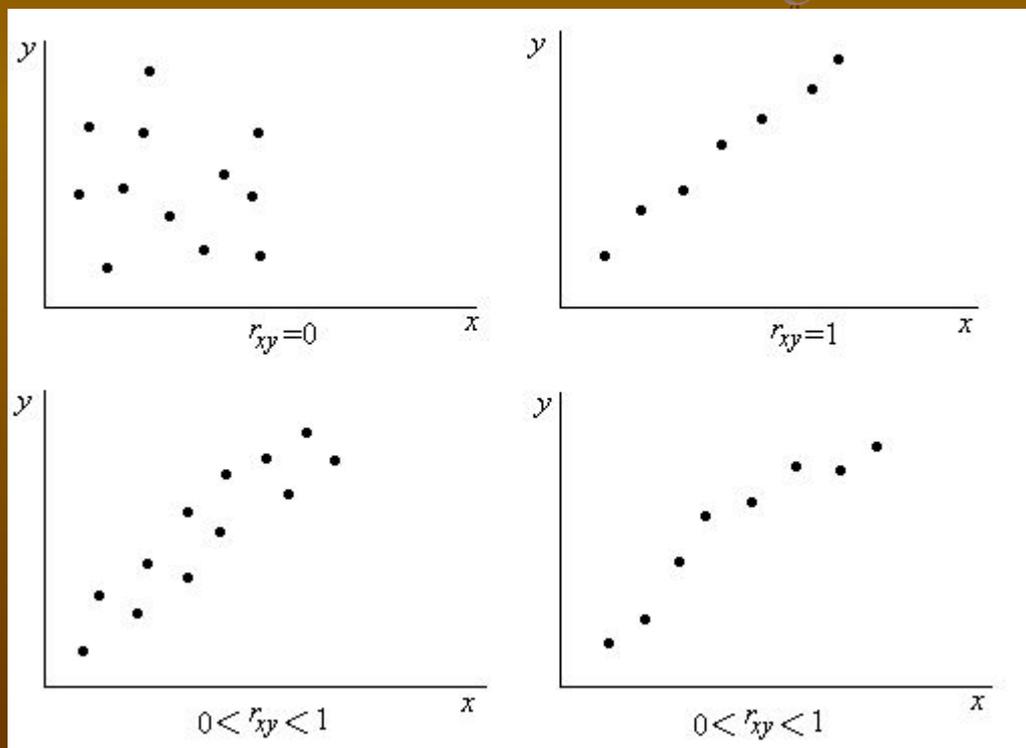
$$H_c : c_k = 0, k = 1, n$$

- по методу наименьших квадратов находят оценки параметров m, a_i, b_j, c_k минимизируя по указанным переменным (поочередно) функцию

$$s = \alpha (y_{ijk} - m + a_i + b_j + c_k)^2$$

- по каждому фактору вычисляется F -статистика. Величина F есть мера потерь при принятии гипотезы H_0 . Чем больше F , тем хуже модель, отвергающая влияние соответствующего фактора. Таким образом, если вычисленное значение F больше $F_{кр}$, найденного по таблице для некоторого уровня значимости (и $n-1, n^2-3n+2$ степеней свободы), то гипотеза отвергается.
- **Корреляционный и регрессионный анализ**
- Корреляционный и регрессионный анализ – это два близких метода, которые обычно используются совместно для исследования взаимосвязи между двумя или более непрерывными переменными.
- Результаты корреляционного анализа позволяют делать статистические выводы о степени зависимости между переменными.
- Величина линейной зависимости между двумя переменными измеряется посредством простого коэффициента корреляции, величина зависимости от нескольких – посредством множественного коэффициента корреляции.
- В корреляционном анализе используется также понятие частного коэффициента корреляции, который измеряет линейную взаимосвязь между двумя переменными без учета влияния других переменных.

- Если корреляционный анализ позволил установить наличие линейной зависимости наблюдаемой переменной от одной или более независимых, то форма зависимости может быть уточнена методами регрессионного анализа.
- Если уравнение линейно относительно параметров (но не обязательно линейно относительно независимых переменных), то говорят о линейной регрессии, в противном случае регрессия нелинейна.
- Первый шаг заключается в графическом отображении точек (x_i, y_i) на плоскости (x, y) , то есть в построении диаграммы рассеяния



- Регрессионный анализ позволяет решать две задачи:
- устанавливать наличие возможной причинной связи между переменными;
- предсказывать значения переменной по значениям независимых переменных (эта возможность особенно важна в тех случаях, когда прямые измерения зависимой переменной затруднены)
- Уравнение простой линейной регрессии y по x

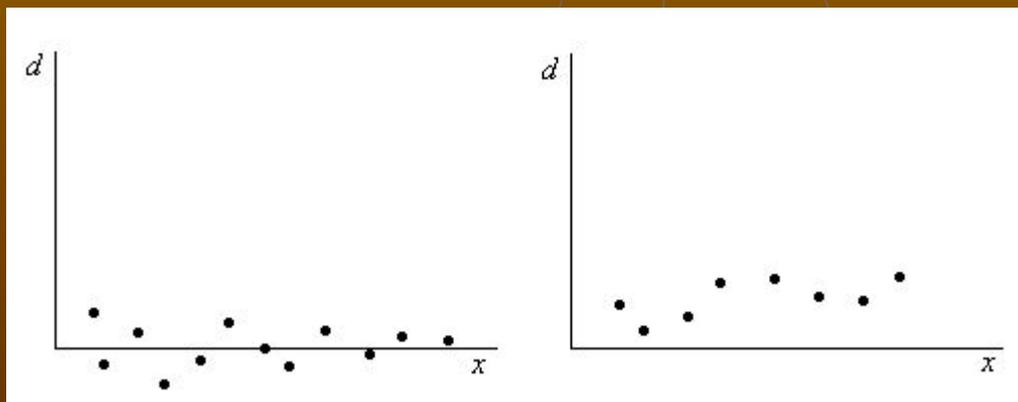
$$y_i = b_0 + b_1 x_i + e_i$$

$$y_i^* = b_0^* + b_1^* x_i^*$$

- Разница между наблюдаемым и оцененным значением y при $x=x_i$ называется отклонением (или остатком) .

$$d_i = y_i - y_i^*$$

- Для проверки адекватности модели строятся графики $d=f(y)$ или $d=f(x)$



ВЫВОДЫ

- В тех случаях, когда поведение исследуемой системы зависит от воздействия большого числа случайных факторов, либо интерес представляет развитие ситуации во времени, удобнее всего использовать имитационные модели. Основная особенность таких моделей – обеспечение возможности проведения статистического эксперимента.
- В зависимости от того, какие аспекты поведения исследуемой системы или операции вас интересуют, ее модель может быть описана либо как последовательность событий, либо как совокупность взаимодействующих процессов, либо как последовательность операций обслуживания транзактов.
- Создание имитационной модели сложной системы, функционирование которой предполагает наличие параллельных процессов, является весьма сложным делом, требующим от разработчика не только хорошего знания рассматриваемой предметной области, но достаточно прочных навыков в программировании.
- Результаты имитационного эксперимента могут быть использованы для принятия решения лишь при условии их корректной статистической обработки, что предъявляет к уровню подготовки исследователя целый ряд дополнительных требований.
- Существенное повышение технологичности подготовки, проведения и анализа результатов имитационного моделирования возможно в том случае, если в распоряжении исследователя имеются соответствующие инструментальные средства.

