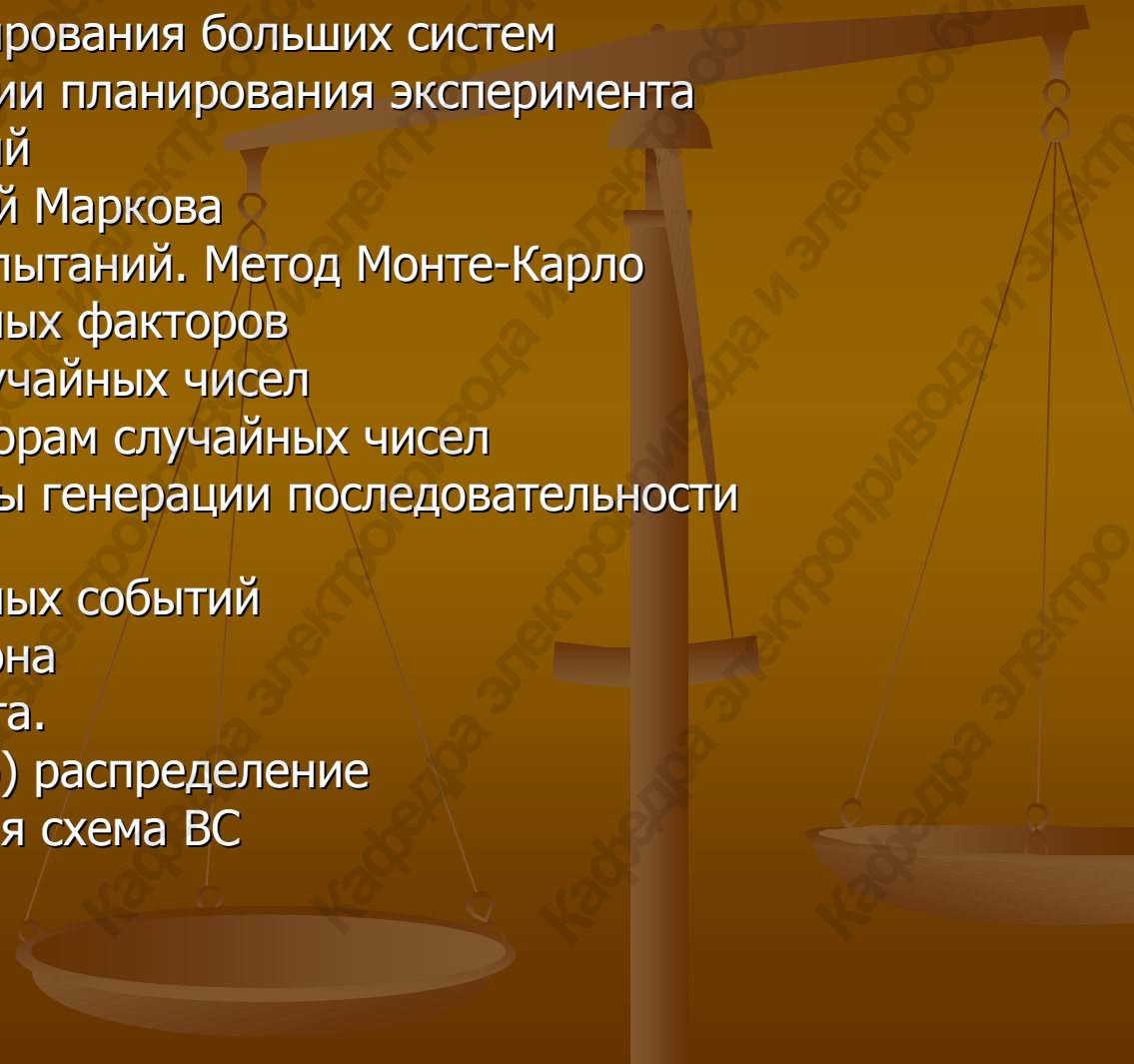
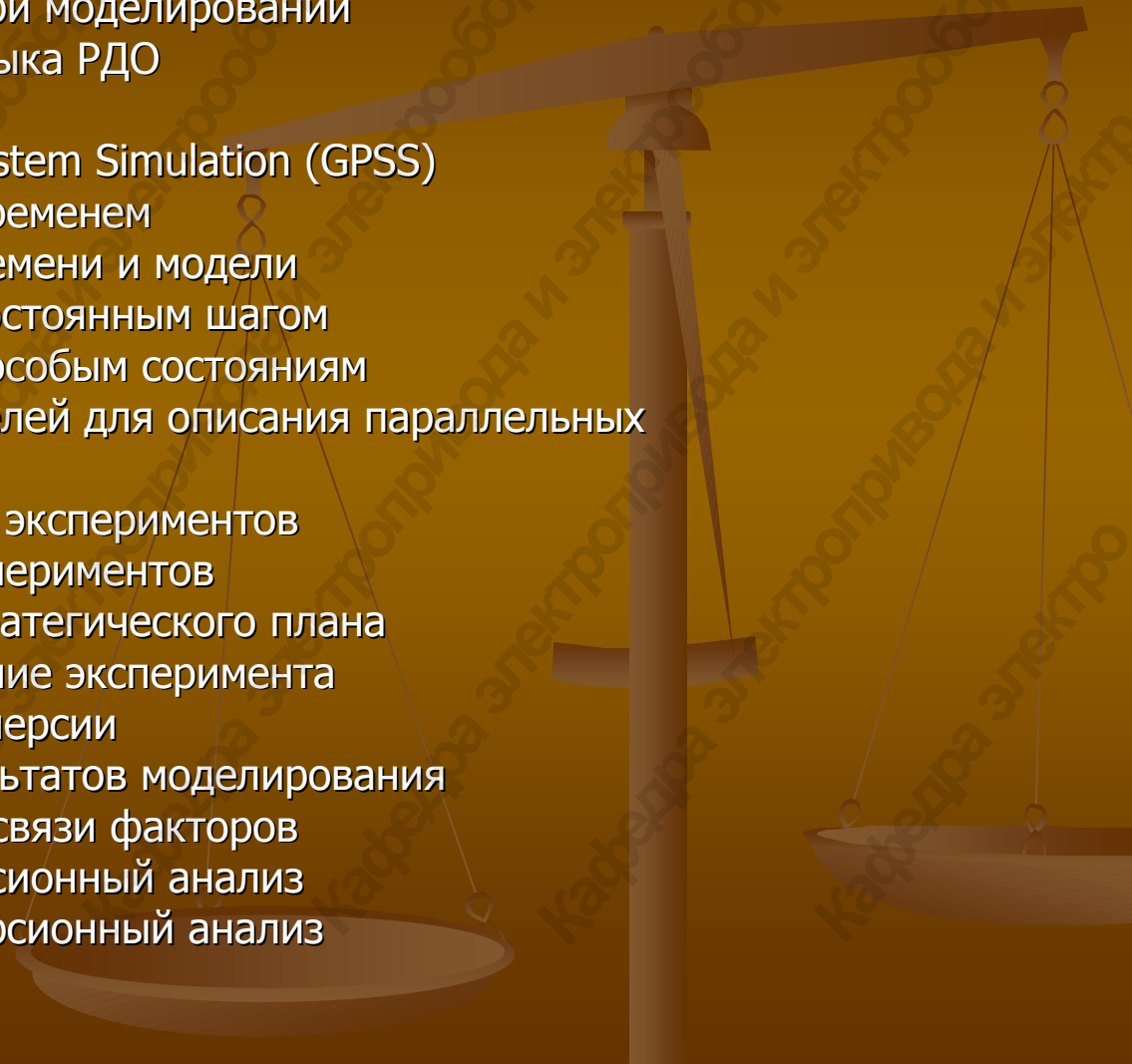


Содержание курса

- 1. Классификация видов моделирования и имитационных моделей
- 2. Основные понятия теории моделирования
- 3. Типовые математические схемы
- 4. Формализация и алгоритмизация процесса функционирования сложных систем
- 5. Основные этапы моделирования больших систем
- 6. Основные понятия теории планирования эксперимента
 - 6.1. Метод псевдосостояний
 - 6.2. Метод вложения цепей Маркова
 - 6.3. Метод статических испытаний. Метод Монте-Карло
- 7. Моделирование случайных факторов
 - 7.1. Методы генерации случайных чисел
 - 7.2. Требования к генераторам случайных чисел
 - 7.3. Простейшие алгоритмы генерации последовательности псевдослучайных чисел
- 8. Моделирование случайных событий
 - 8.1. Распределение Пуассона
 - 8.2. Распределение Эрланга.
 - 8.3. Нормальное (Гауссово) распределение
- 9. Обобщенная структурная схема ВС



- 10. Моделирование систем и языки моделирования
- 10.1. Классификация языков имитационного моделирования
- 10.2. Формальное описание динамики моделируемого объекта
- 10.3. Языки, ориентированные на события.
- 10.4. Языки, ориентированные на процессы.
- 10.5. Сравнение универсальных и специализированных языков программирования при моделировании
- 10.6. Основные концепции языка РДО
- 10.7. AnyLogic™
- 10.8. Язык General Purpose System Simulation (GPSS)
- 11. Управление модельным временем
- 11.1. Виды представления времени и модели
- 11.2. Изменение времени с постоянным шагом
- 11.3. Изменение времени по особым состояниям
- 12. Применение сетевых моделей для описания параллельных процессов
- 13. Планирование модельных экспериментов
- 13.1. Цели планирования экспериментов
- 13.2. Способы построения стратегического плана
- 13.3. Тактическое планирование эксперимента
- 13.4. Методы понижения дисперсии
- 14. Обработка и анализ результатов моделирования
- 15. Оценка влияния и взаимосвязи факторов
- 15.1. Однофакторный дисперсионный анализ
- 15.2. Многофакторный дисперсионный анализ



ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС



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.

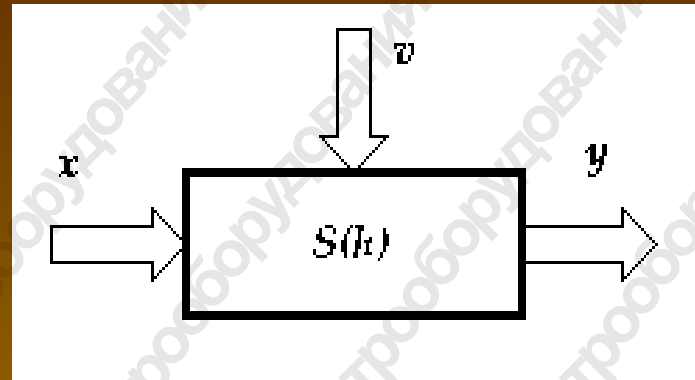
НЕДОСТАТКИ:

- 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 .

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС



ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС



- 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

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

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

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

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

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

$$z_k \in Z, k = \overline{1, n_z}$$

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

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

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

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

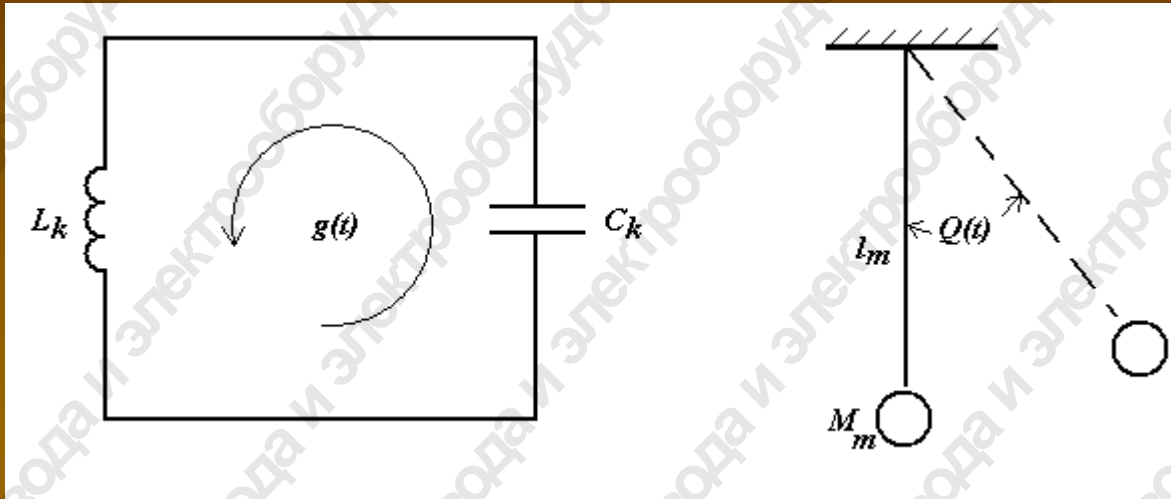
$$T^* = m\Delta t,$$

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС

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

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС

Непрерывно-детерминированные модели D -схемы (dynamic)



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

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

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

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

$$h_1 = 0$$

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

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

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.

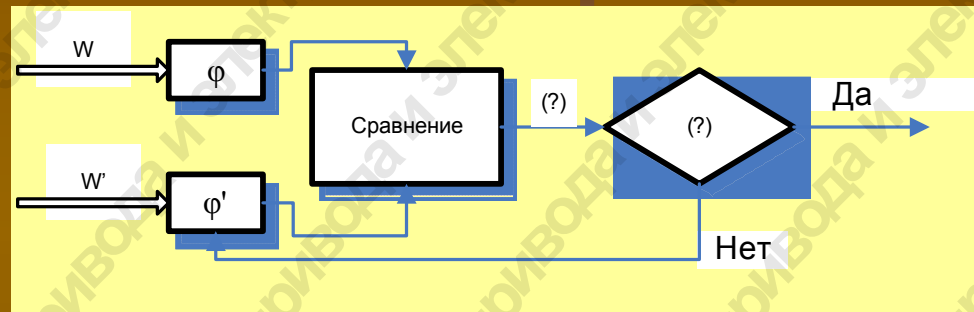
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМС

- 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.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ

Случайные факторы: случайные события; случайные величины; случайные функции (процессы)

Основные анализируемые характеристики генерируемых датчиком последовательностей:

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

$$N_j = N \cdot C_{jl} \cdot p_{i(1)}$$



- 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.

Простейшие алгоритмы генерации последовательности псевдослучайных чисел

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

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

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

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

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

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

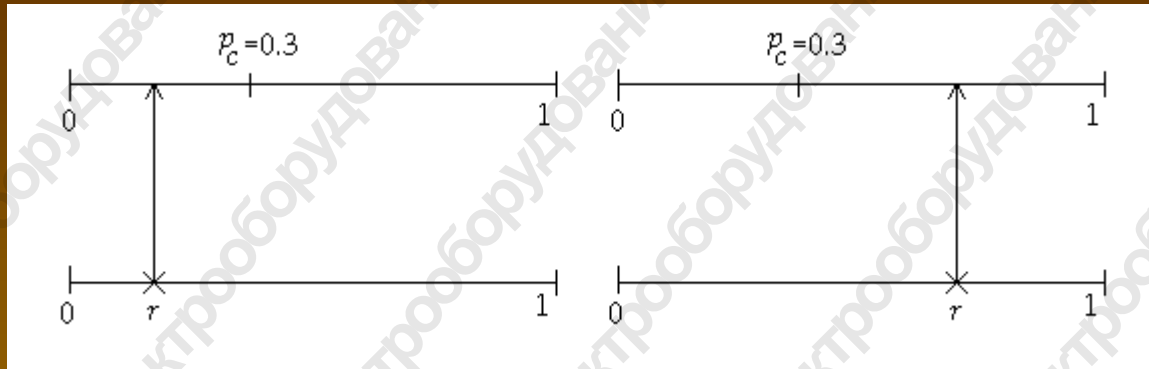
$$x = \left(-\frac{1}{\lambda}\right) \ln(1 - R)$$

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

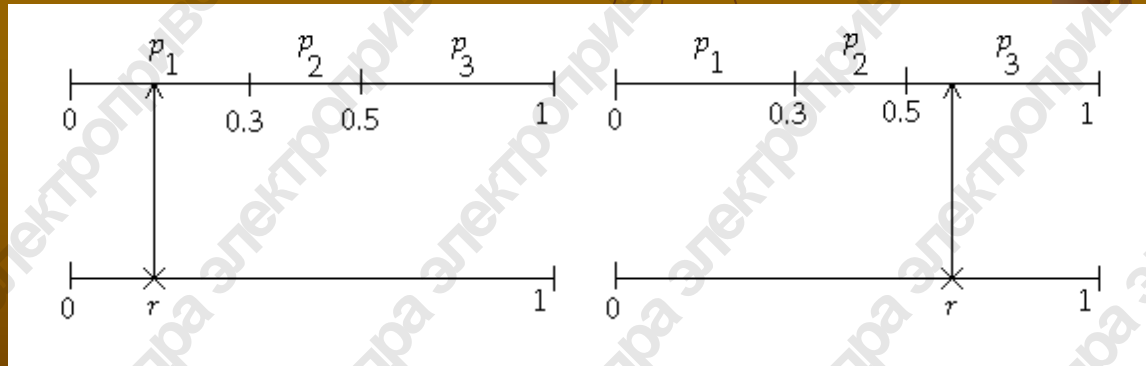
$$x = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k \left(-\frac{1}{\lambda}\right) \ln(1 - R_i) \right) = -\frac{1}{k\lambda} \sum_{i=1}^k \ln(1 - R_i)$$

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

Моделирование случайных событий



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



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

Моделирование непрерывных случайных величин

- Метод нелинейных преобразований
- Метод композиций
- Табличный метод

$$x = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln(r)$$

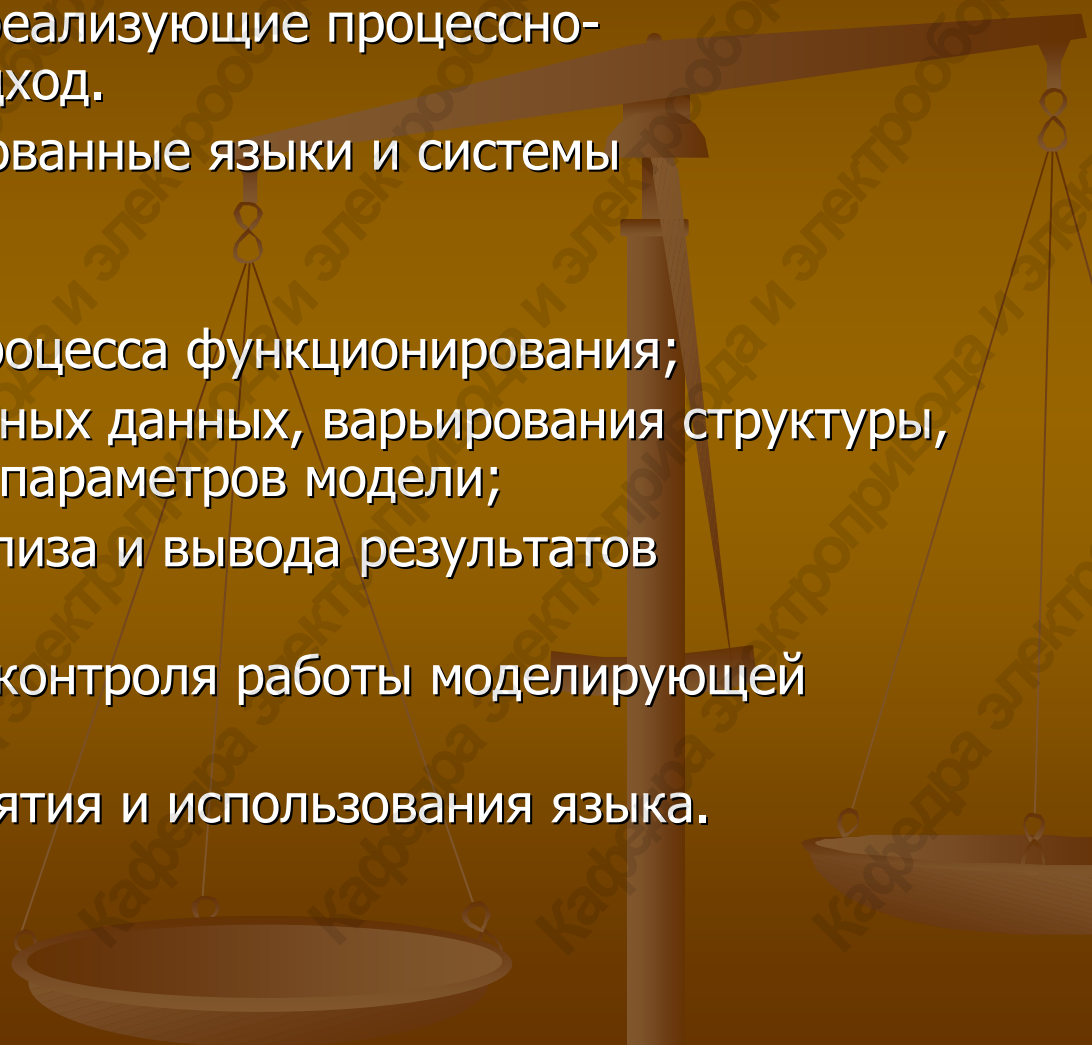
$$x = m + s \left[\sum_{i=1}^{12} r_i - 6 \right]$$

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

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

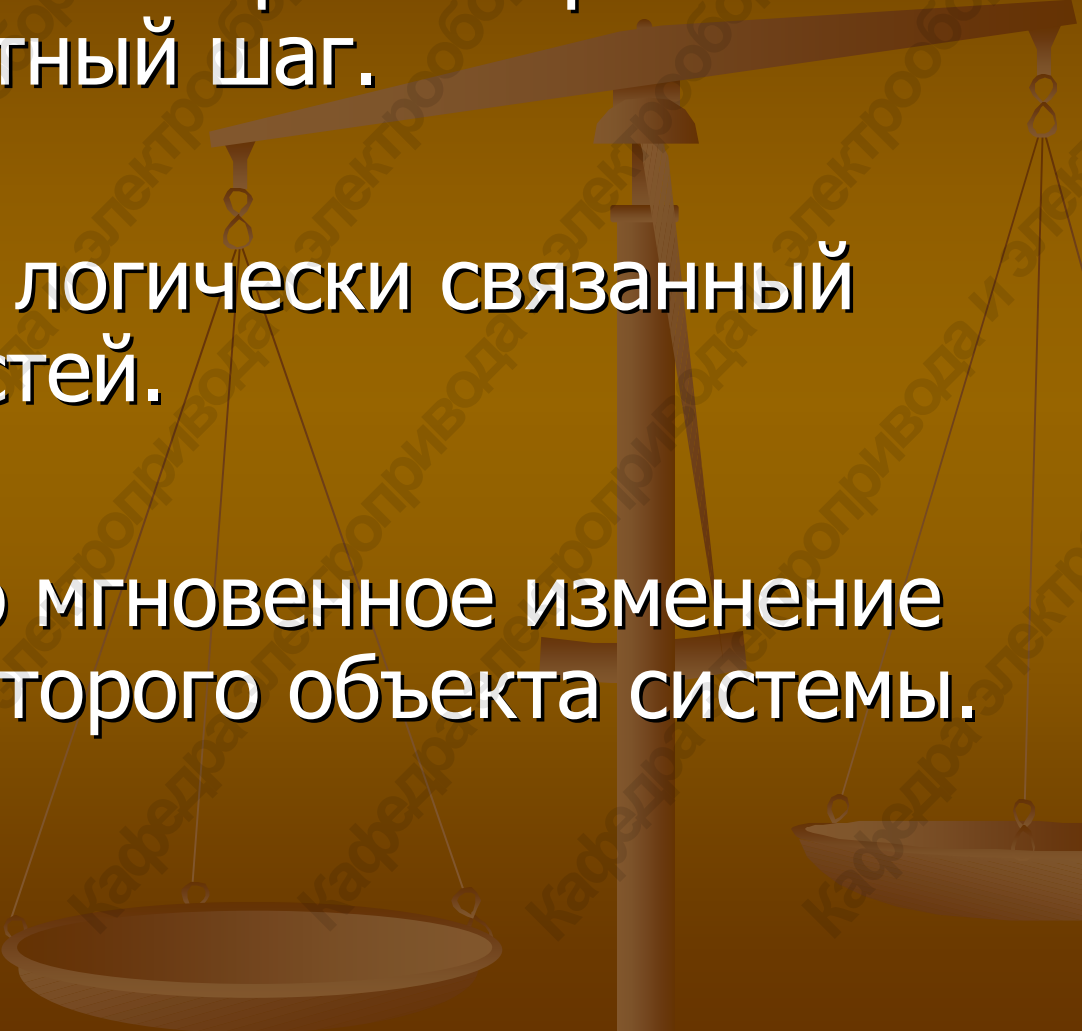


Моделирование систем и языки моделирования

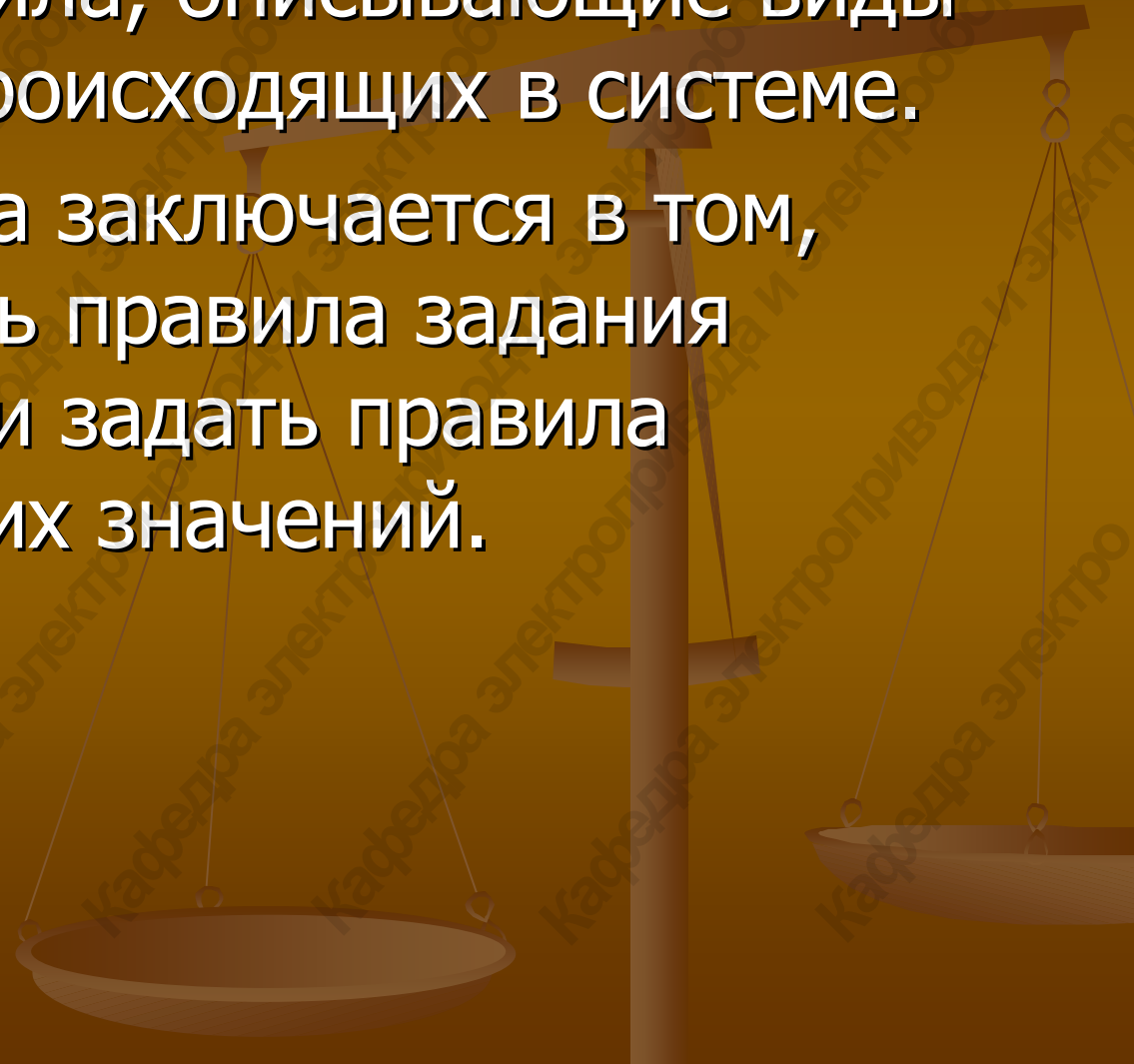
- Универсальные алгоритмические языки высокого уровня.
 - Специализированные языки моделирования: языки, реализующие событийный подход, подход сканирования активностей, языки, реализующие процессно-ориентированный подход.
 - Проблемно-ориентированные языки и системы моделирования.
 - Удобство описания 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



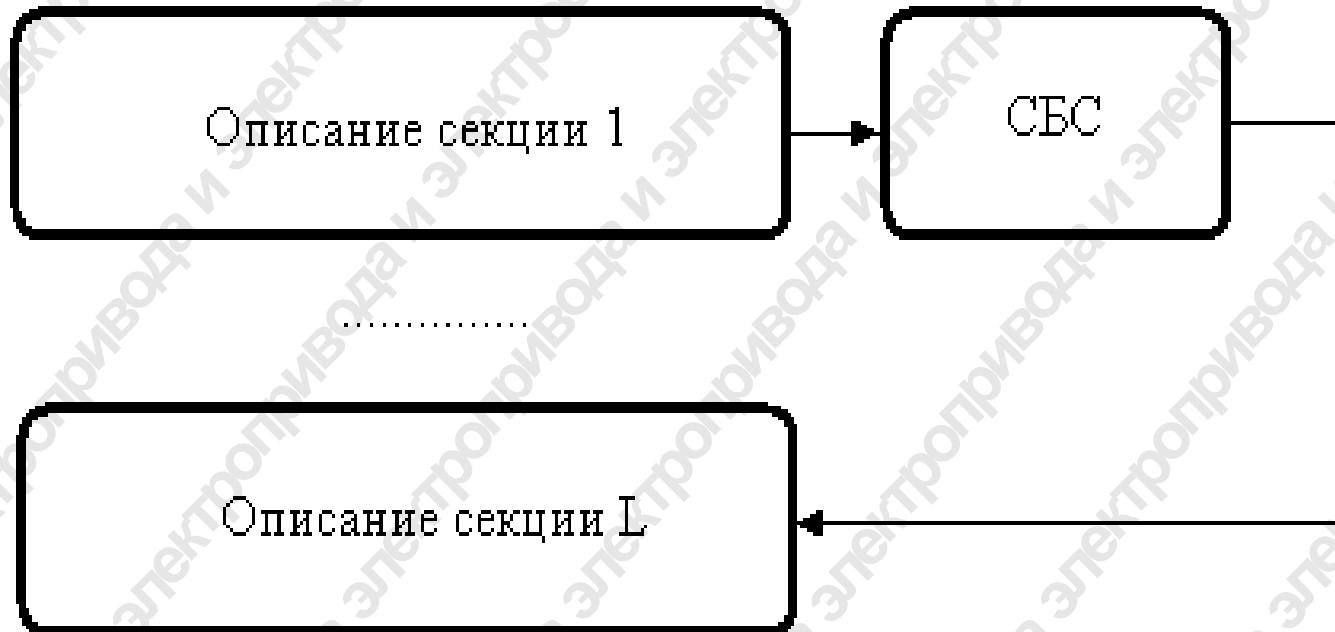
- **АКТИВНОСТЬЮ** является наименьшая единица работы и её рассматривают как единый дискретный шаг.
 - **Процесс** – это логически связанный набор активностей.
 - **События** – это мгновенное изменение состояния некоторого объекта системы.
- 

- 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.

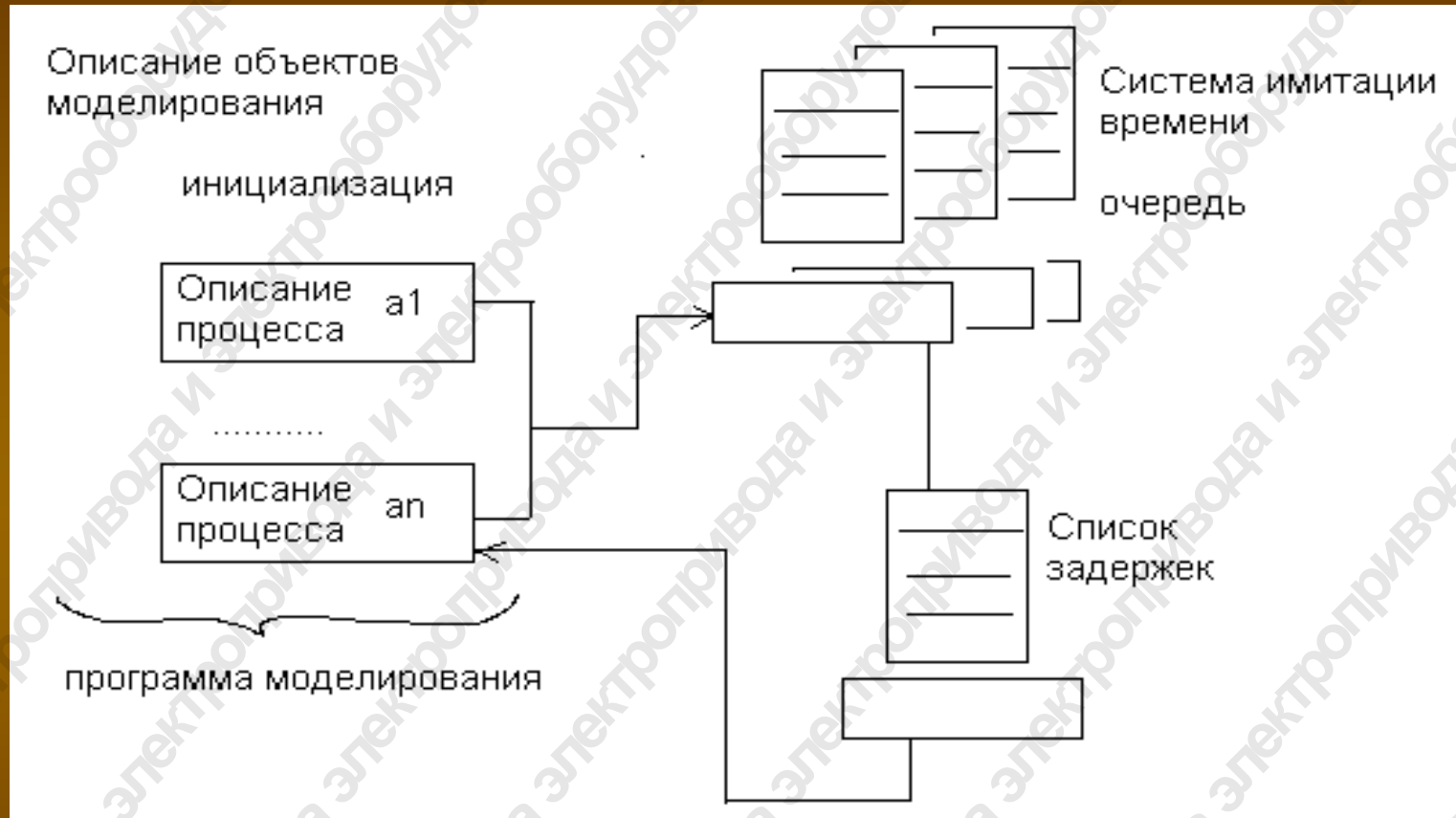


Языки, ориентированные на события

Процедура инициализации



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>**

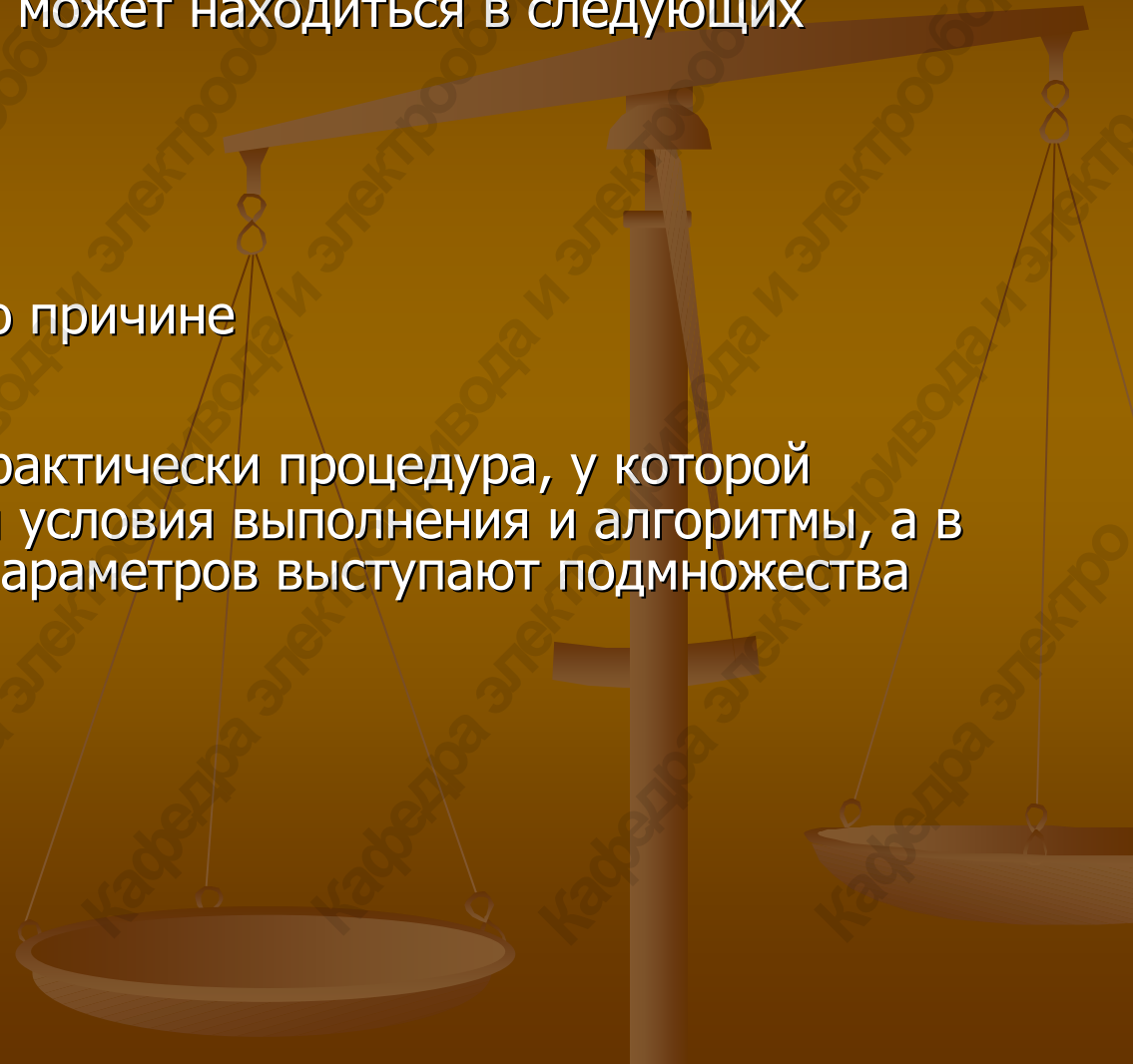
Ресурсы

- **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.



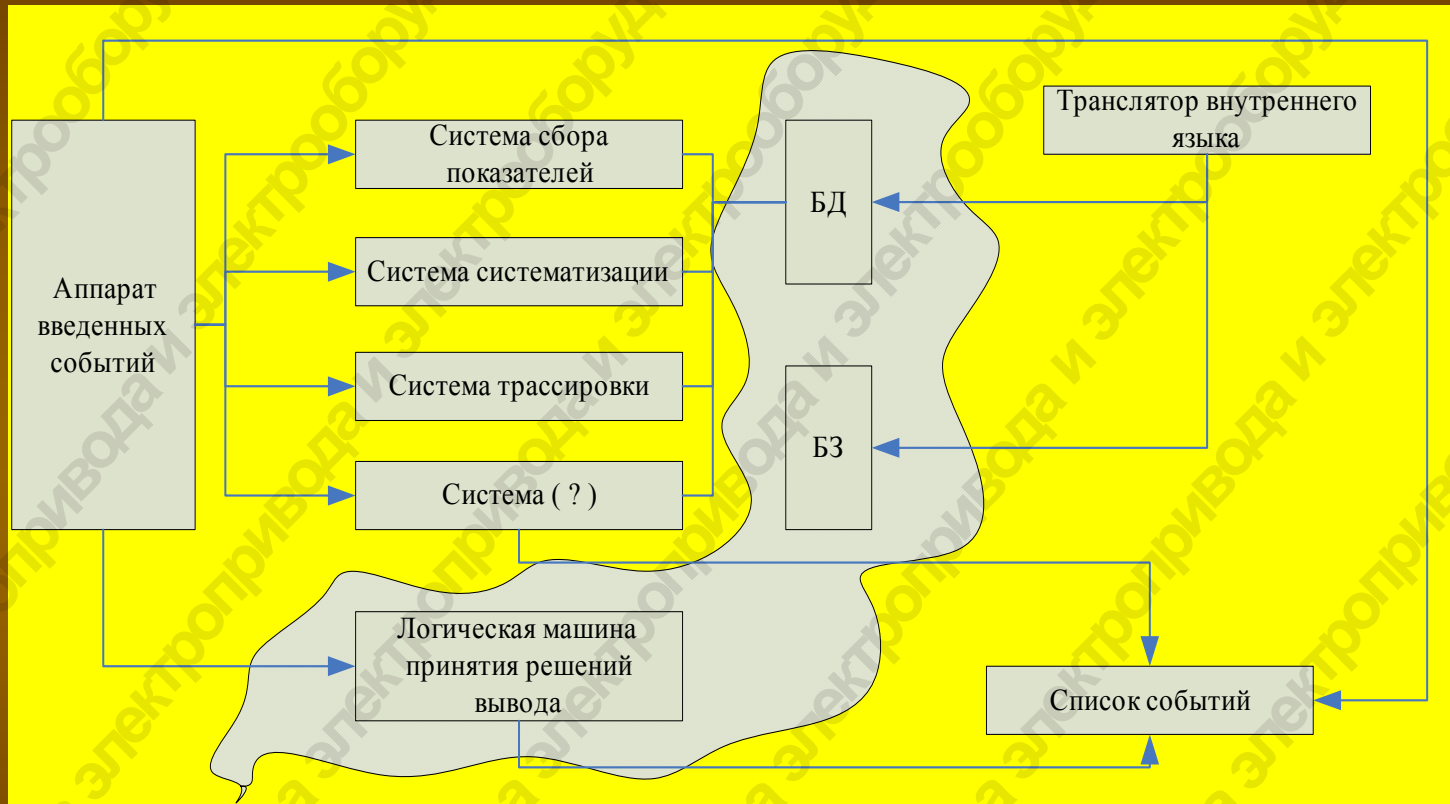
Представление сложной дискретной системы в РДО методе



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 предусловия, 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:

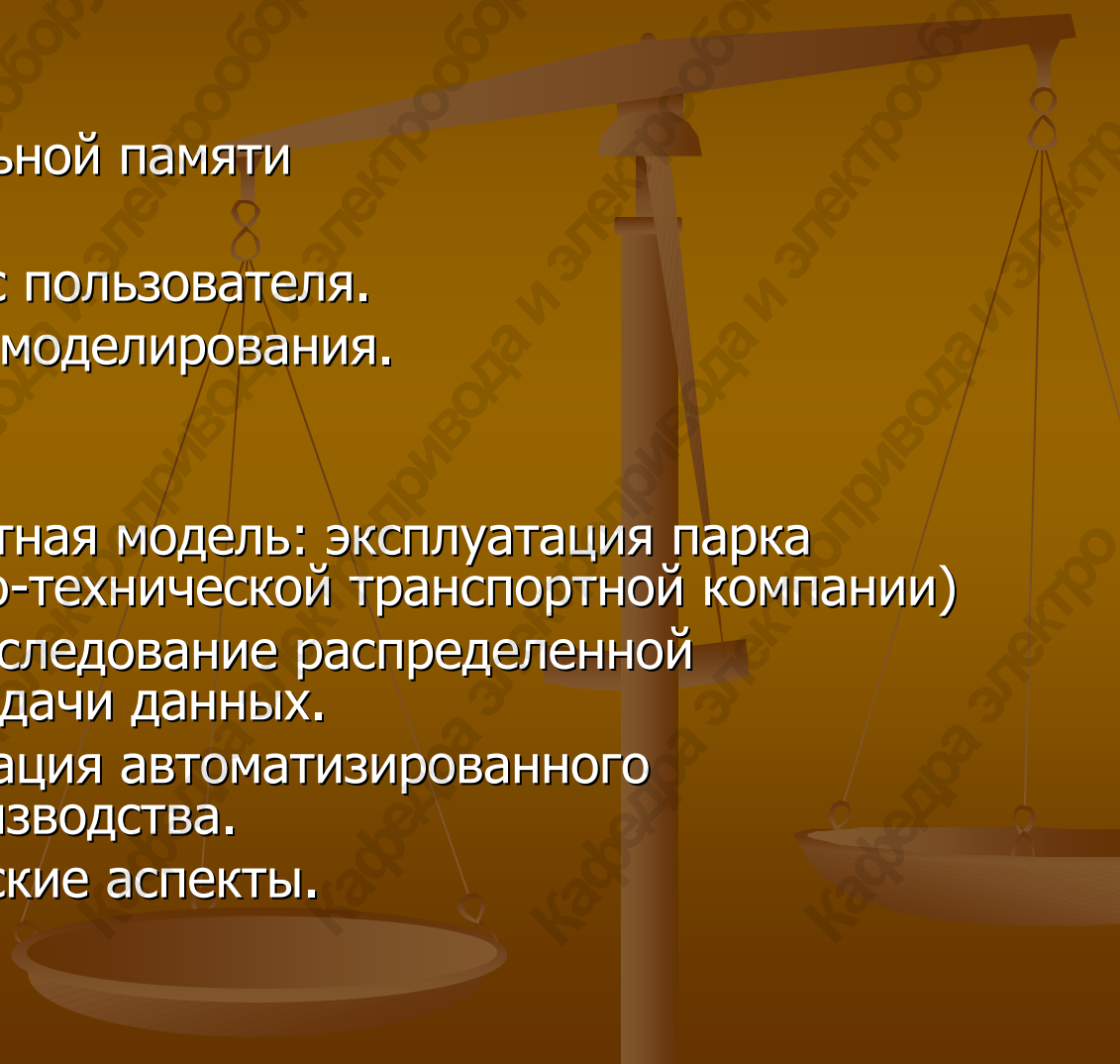
- Стратегический
 - Операционный
 - Физический
-
- Система поддерживает все элементы динамики:
 - *накопители,*
 - *потоки,*
 - *обратные связи,*
 - *задержки,*
 - *вспомогательные переменные,*
 - *табличные функции,*
 - *решение различных уравнений.*
 - Протяжка модельного времени определяется по дискретно 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.

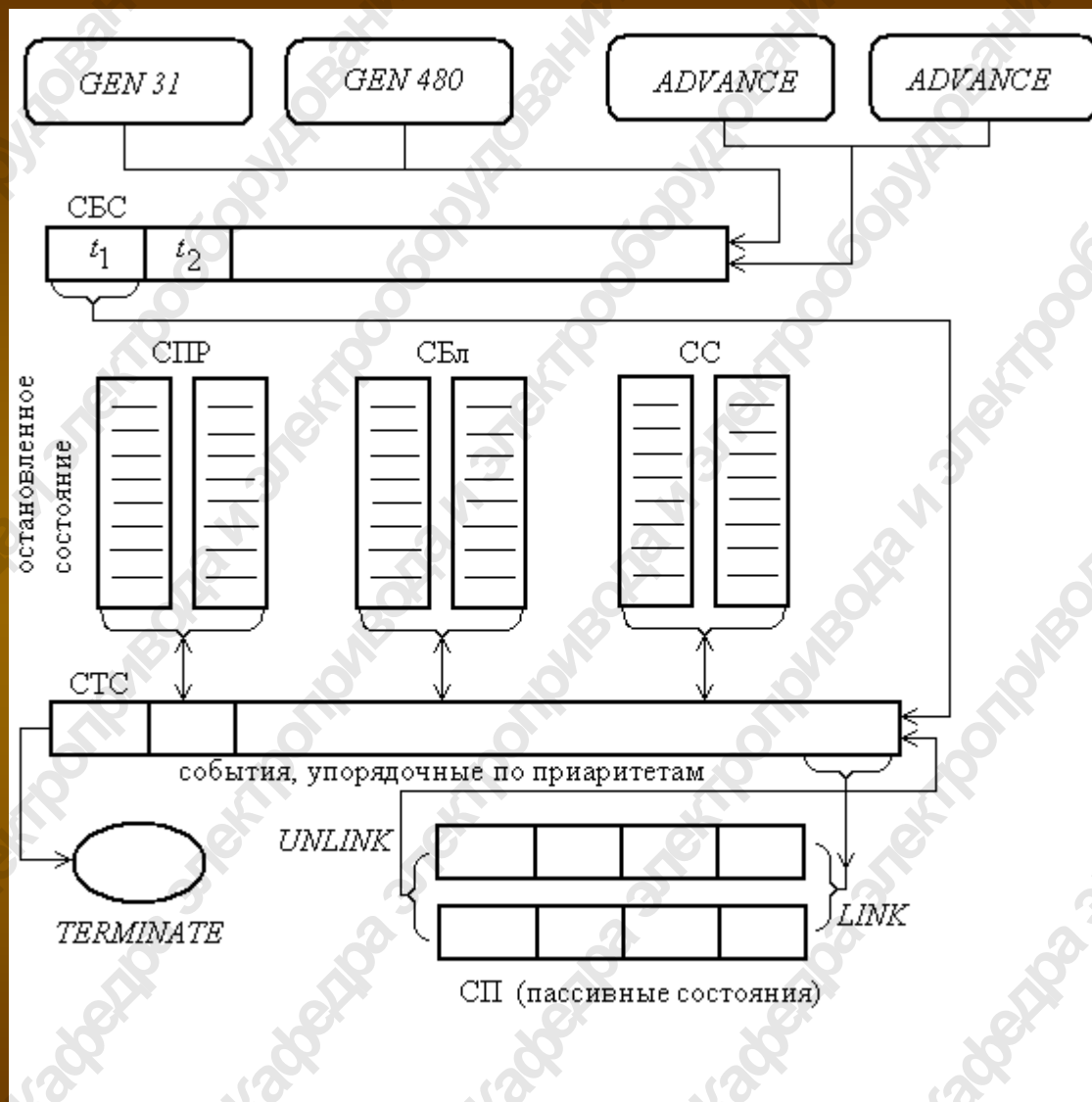
Транзакты

- **Транзакты** представляют собой описание динамических процессов в реальных системах. Они могут описывать 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. Изменяется 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
- Атрибутами 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

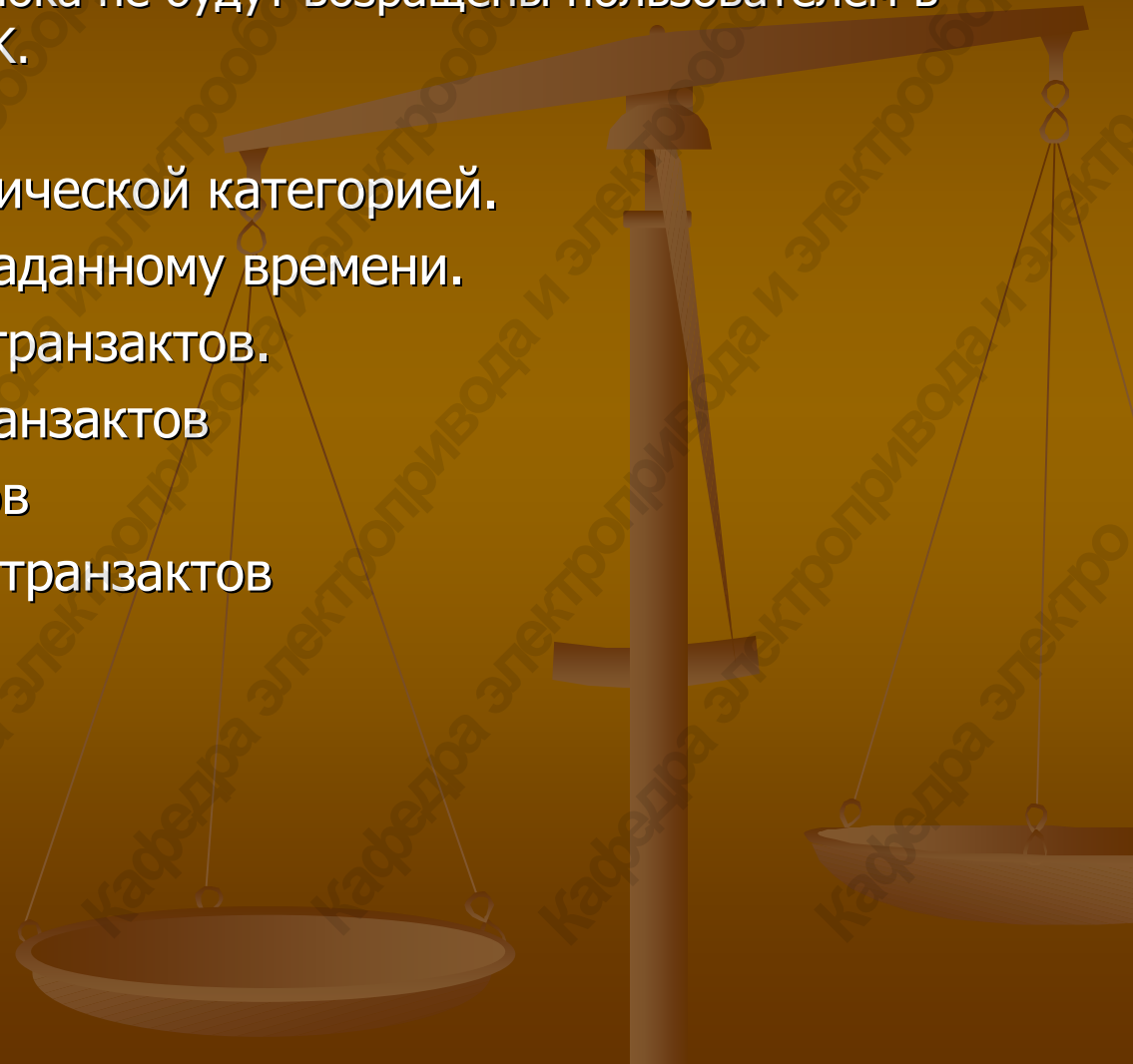


Управление процессом моделирования

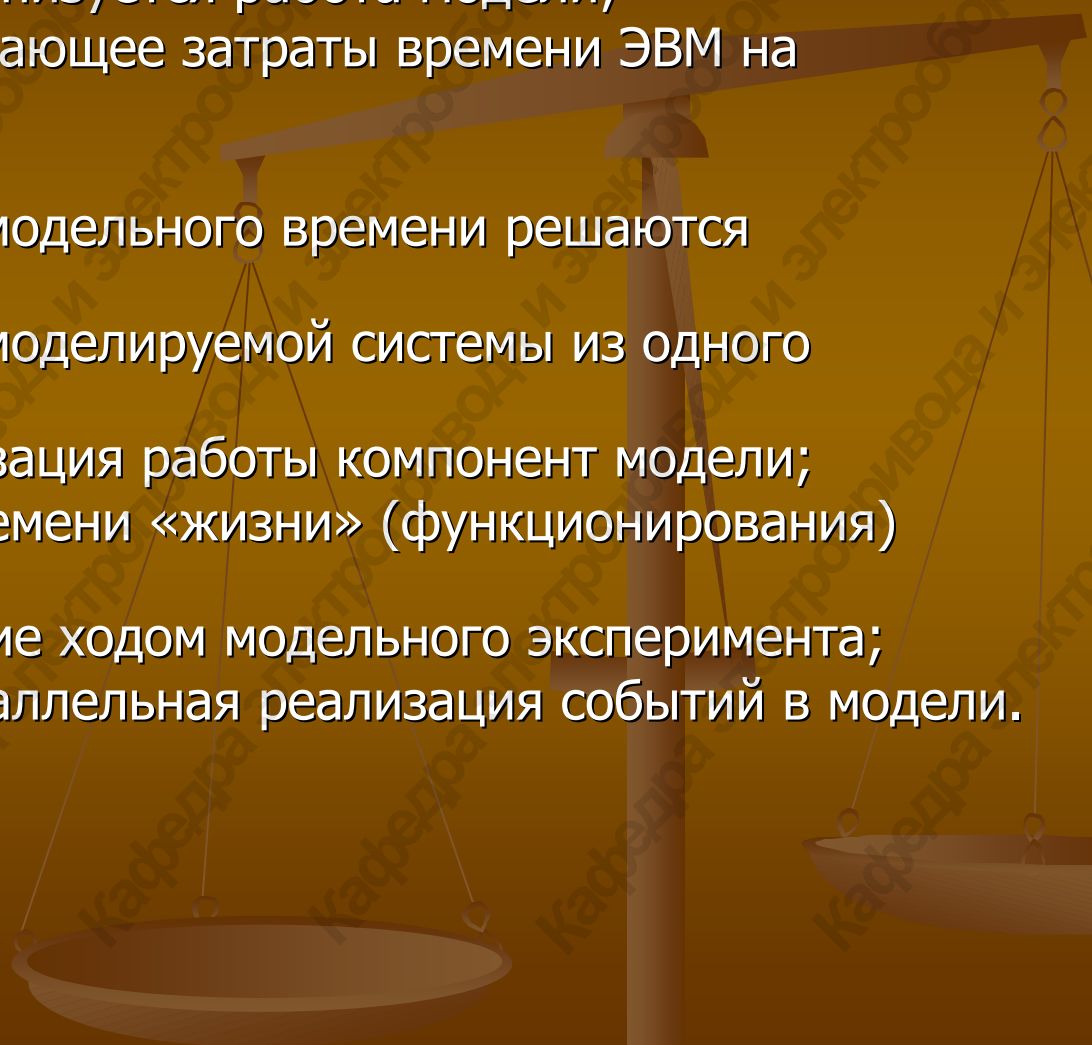
- **Список блокировок** – это список транзактов, которые ожидают изменения состояния ресурса. Существует 6 видов связанных с устройствами, 7 видов связанных с многоканальными устройствами и 2 вида связанных с ключами.
- С устройствами используются списки для занятых и незанятых, доступных и недоступных 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

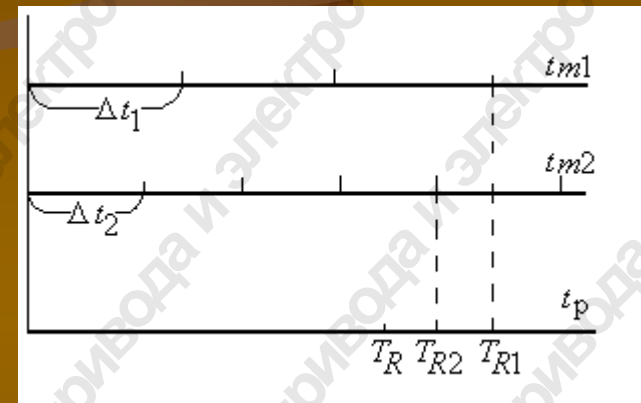
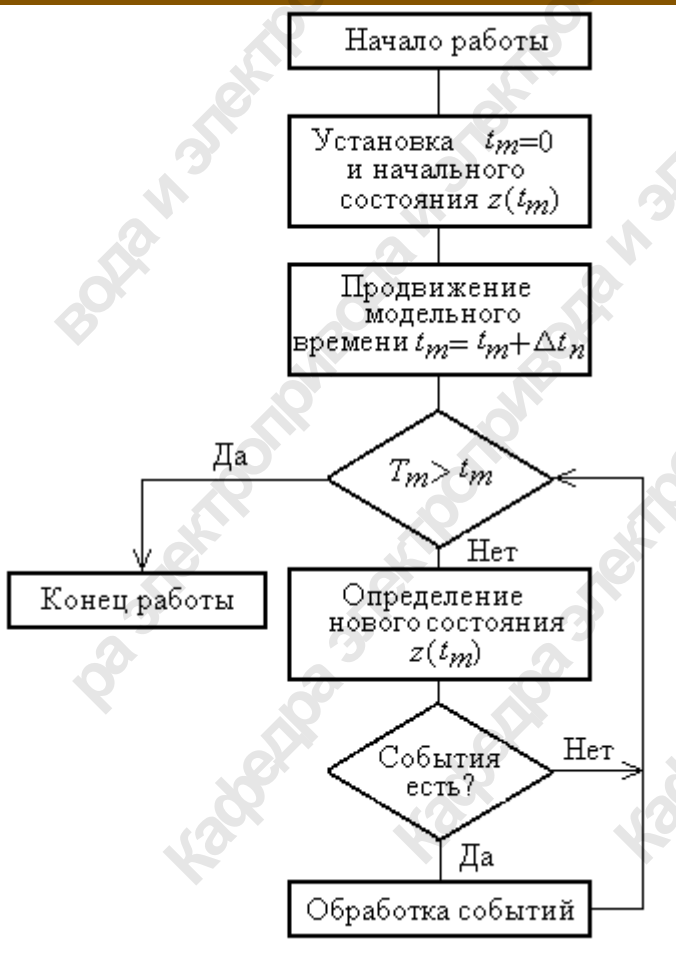


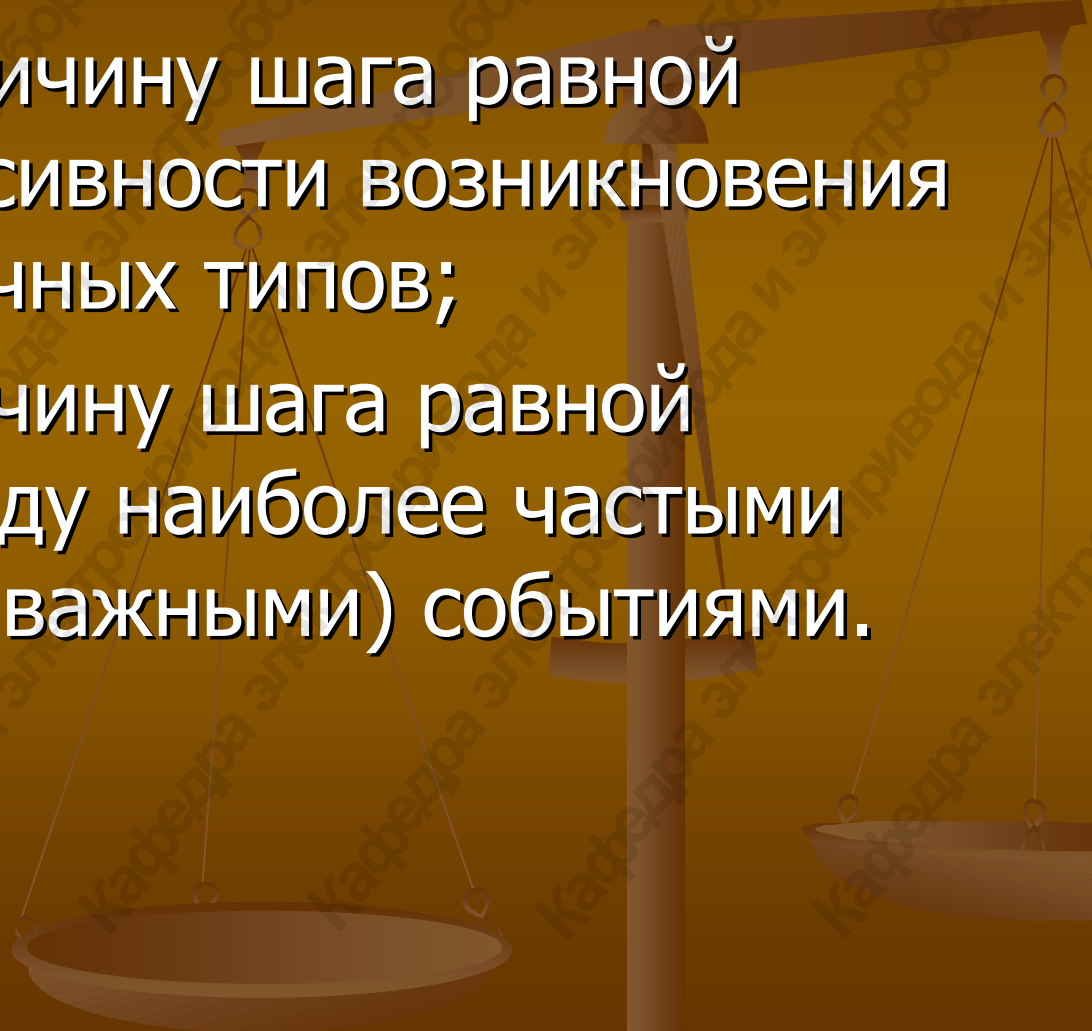
Управление модельным временем

- 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.
- 

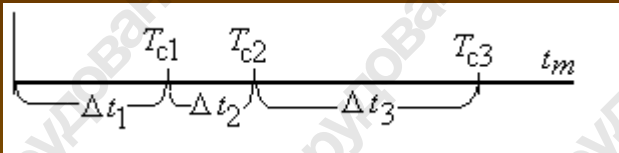
Метод постоянного шага

- 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.

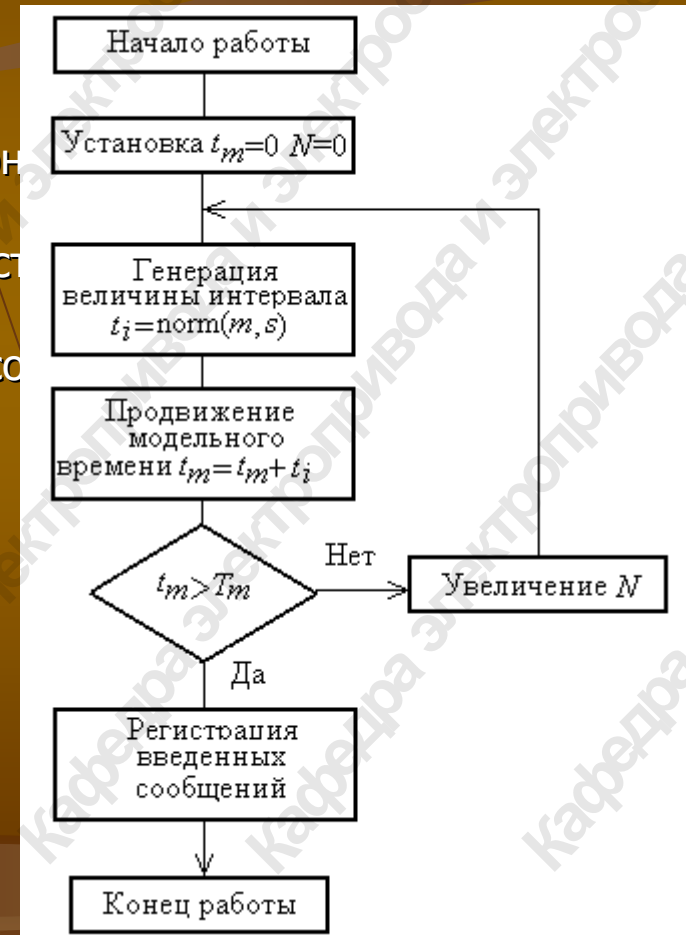
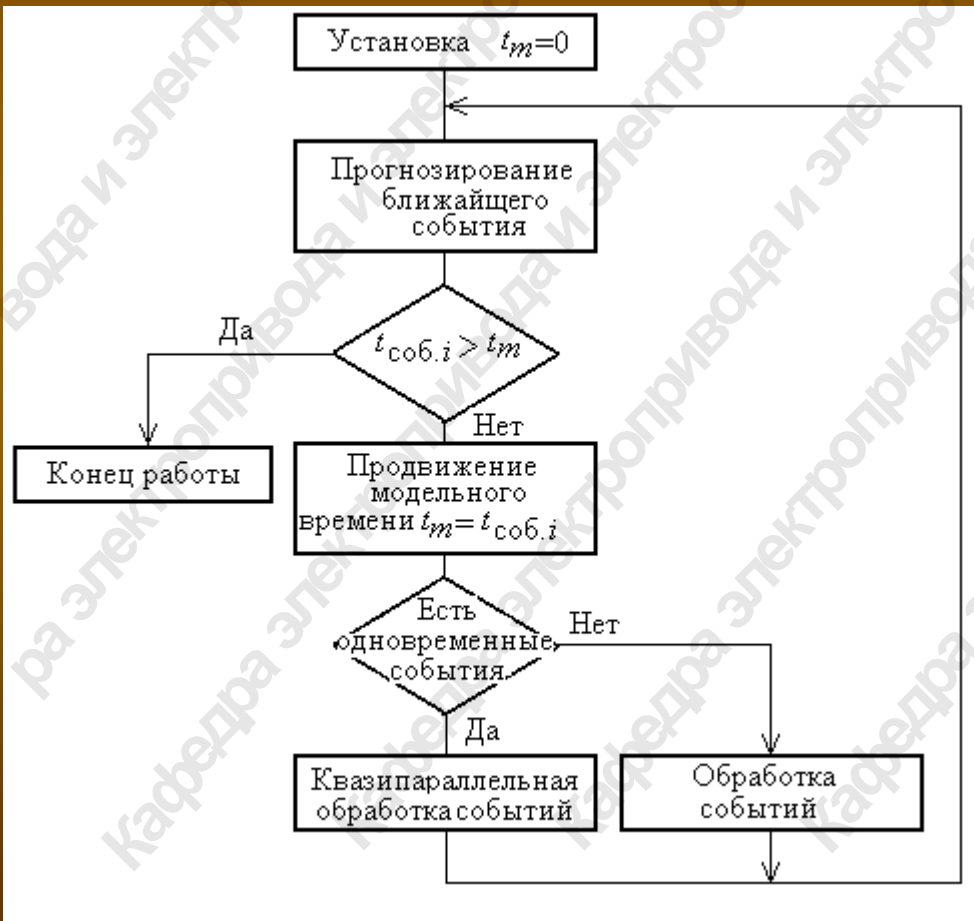


- Подходы для выбора шага моделирования:
 - принимать величину шага равной средней интенсивности возникновения событий различных типов;
 - выбирать величину шага равной интервалу между наиболее частыми (или наиболее важными) событиями.
- 

Изменение времени по особым состояниям



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



Планирование модельных экспериментов

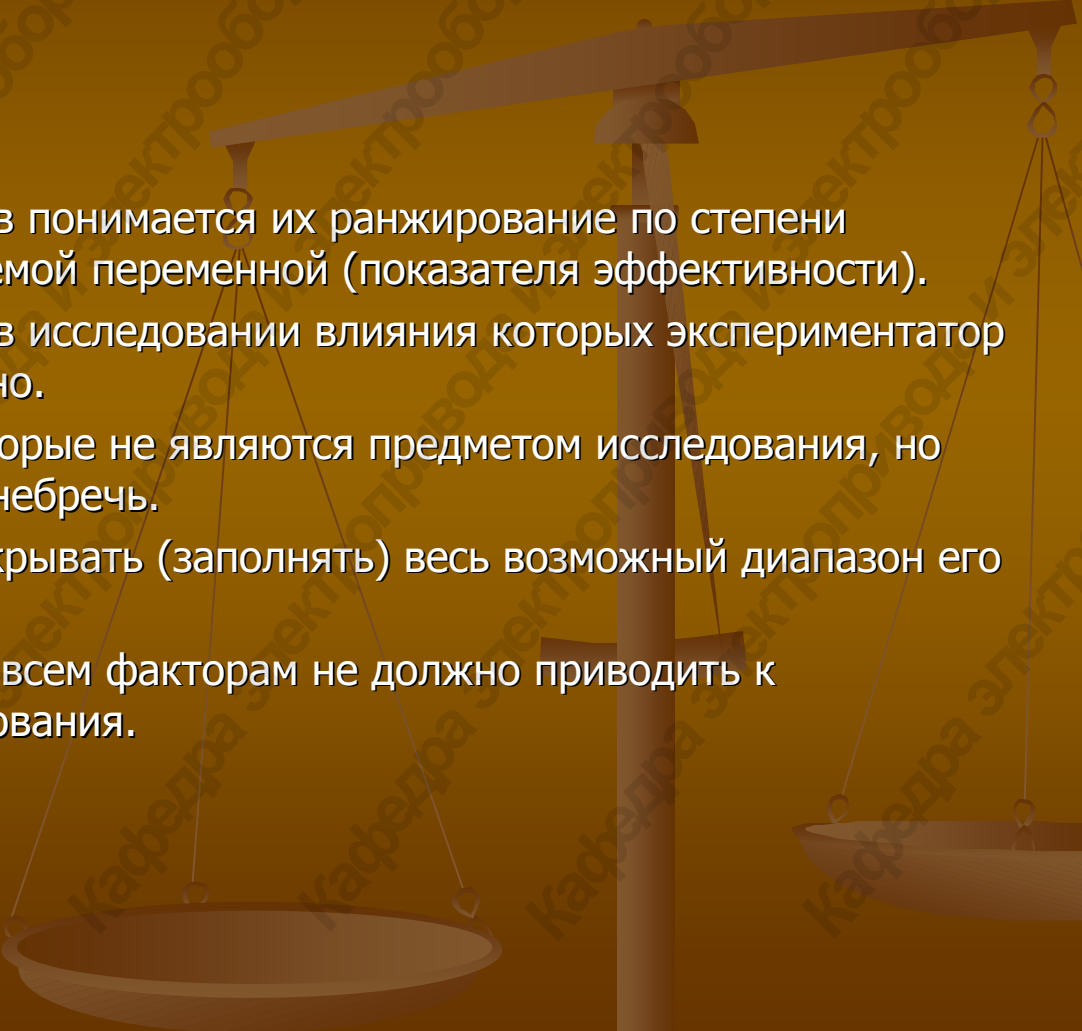
- Во-первых, исследователь и на этапе планирования эксперимента должен помнить, к какому классу относится моделируемая система (статическая или динамическая, детерминированная или стохастическая и т. д.).
- Во-вторых, он должен определить, какой режим работы системы его интересует: стационарный (установившийся) 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.**

$$y = f(x) + e(x)$$

- **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.

Стратегическое планирование имитационного эксперимента

- 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).

$$N = l_1 \cdot l_2 \cdot l_3 \dots l_k$$

$$N = L_k$$

- 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 |

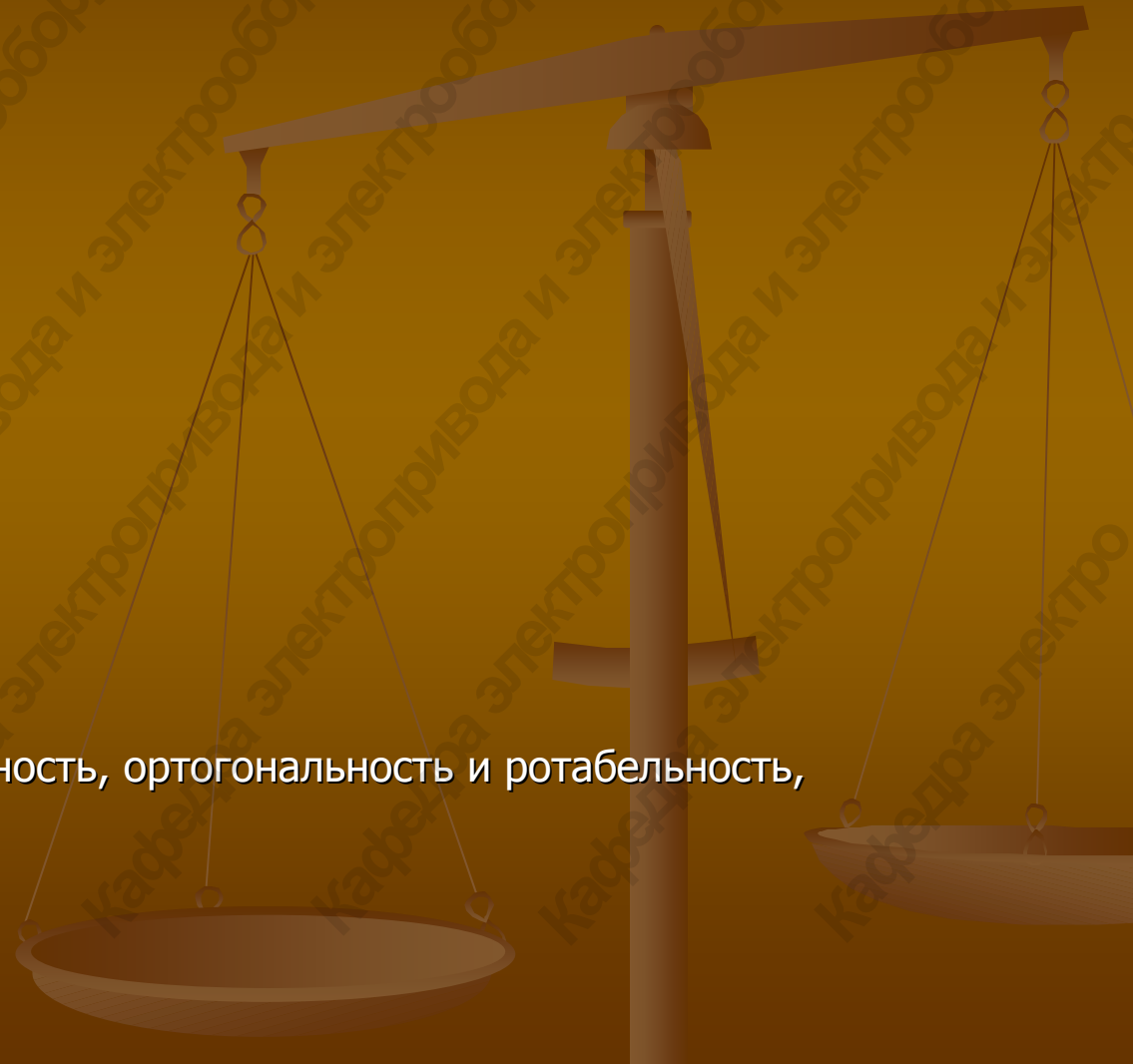
- Эксперимент с изменением факторов по одному
- $N=1+2+\dots+l+n$
- Дробный факторный эксперимент
- $N=2^k$

| 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 |

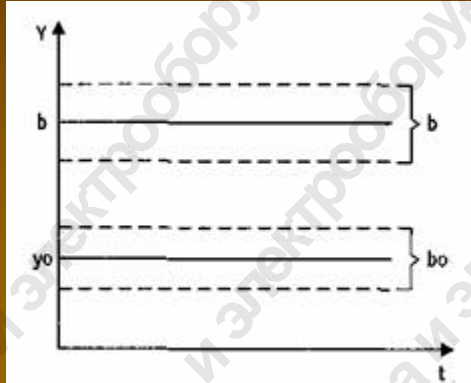
- симметричность, нормированность, ортогональность и ротабельность,



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 .

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

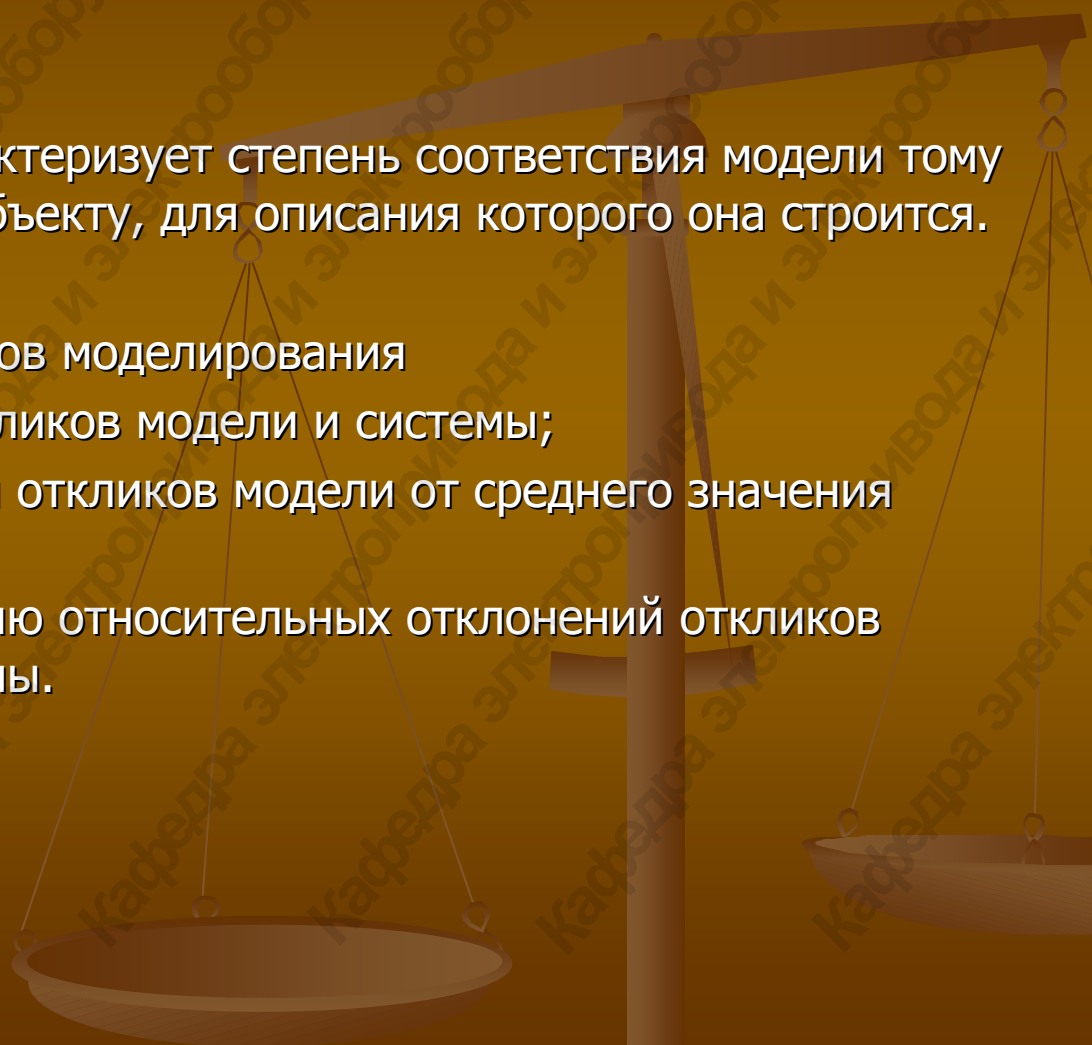
$$D_{yi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k N_i \cdot D_{yi}$$



- Косвенные методы понижения дисперсии основаны на том, что зачастую некоторые из выходных характеристик модели получить (вычислить) легче, чем другие. Их использование 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 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_{KP} взятым из справочной таблицы. Если выполняется неравенство $t_n < t_{KP}$, 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.

- 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.

$$x = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)$$

$$y = (y_1 + y_2 + \dots + y_m)$$

$$x_1 > y_1$$

- $N=m=3$
- $y_1, x_1, y_3, x_2, y_2, x_3$
- $(x_1y_1), (x_3y_1), (x_3y_2), (x_3y_1), (x_2y_3), (x_2y_1)$

$$|U - M| > U_{кр}$$

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

$$x = x_{\max}$$

$$x = x_{\min}$$

$$y_1 = f(x_{\max})$$

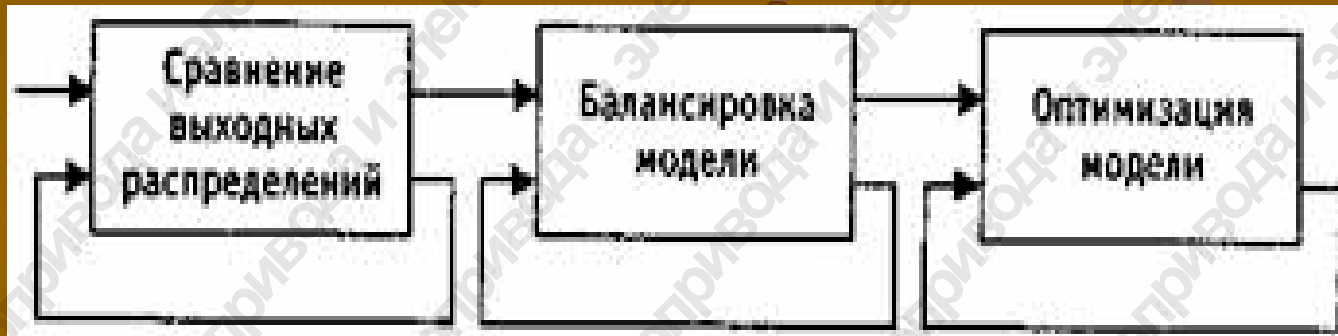
$$y_2 = f(x_{\min})$$

- Вычисляется относительное приращение наблюдаемой переменной y

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

Калибровка модели

- 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 ИМ.
- 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.

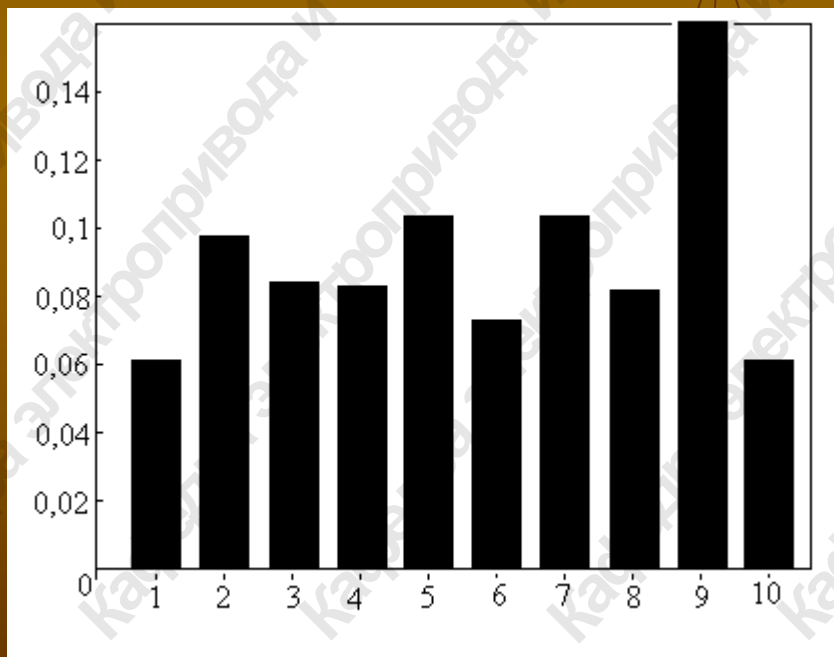
Подбор параметров распределений

- Статистическая гипотеза – это утверждение относительно значений одного или более параметров распределения некоторой величины или о самой форме распределения

$$P(Z \in B | H_0 \text{ верна}) \leq \alpha$$

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

$$G_i = R_i / N$$



- 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).

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

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

$$F = D_x / D_y$$

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

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

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



Применение сетевых моделей для описания параллельных процессов

- Сети Петри
- Достоинства:
- могут быть представлены как в графической форме (что обеспечивает наглядность), так и в аналитической (что позволяет автоматизировать процесс их анализа).
- $P=(B, D, I, O, M)$

где $B=bi$ - конечное непустое множество позиций;

- $D=dj$ - конечное непустое множество переходов;
- $I: B \times D$ - входная функция (прямая функция инцидентности), которая для каждого перехода задает множество его входных позиций;
- $O: D \times B$ - выходная функция (обратная функция инцидентности), которая для каждого перехода задает множество его выходных позиций;
- M - функция разметки сети, ставит каждой позиции сети в соответствие неотрицательное целое число (равное числу меток в данной позиции).

