

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**А.Г. КОКИН**

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ**

**Учебное пособие**

**Курган 2011**

УДК 519.872.5(075.8)  
К60

**Рецензенты:** кафедра прикладной информатики и экономики ГО ВПО Шадринского государственного педагогического института (зав.кафедрой - канд. физ.-мат. наук, доцент **В.Ю. Пирогов**); зав. кафедрой информатики и вычислительной техники Курганской государственной сельскохозяйственной академии канд. эконом. наук, доцент **А.Х. Голованова**.

Печатается по решению методического совета  
Курганского государственного университета.

К60 Кокин А.Г. Имитационное моделирование систем: Учебное пособие. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2011. - 98 с.

В учебном пособии излагаются вопросы, связанные с имитационным моделированием систем. Описываются приемы и средства организации программ, применение структур данных. Приведено большое количество примеров, иллюстрирующих возможности и особенности имитационного моделирования.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 230105 “Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем”, преподавателей, инженеров.

Рис.- 24, табл.- 2, библи. - 16 назв.

УДК 519.872.5(075.8)

© Курганский государственный  
университет, 2011  
© Кокин А.Г., 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>СИСТЕМЫ</b> .....	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	4
ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ СИСТЕМ .....	6
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ .....	8
СИСТЕМА И УПРАВЛЕНИЕ .....	10
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ .....	10
<b>ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ</b> .....	15
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ .....	15
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ .....	17
МОДЕЛИ и МОДЕЛИРОВАНИЕ .....	18
КЛАССИФИКАЦИЯ и СВОЙСТВА МОДЕЛЕЙ .....	20
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b> .....	24
ПРОЦЕДУРЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	24
ЭТАПЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	26
<b>ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ</b> .....	29
ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	29
ВИДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	34
ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	38
<b>СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ</b> .....	44
СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ .....	44
СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОТКАЗАМИ .....	53
СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОЖИДАНИЕМ .....	55
<b>МОДЕЛИ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ</b> .....	61
МОДЕЛЬ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СМО С ОТКАЗАМИ НА GPSS .....	61
ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И ОПТИМИЗАЦИЯ .....	63
МОДЕЛЬ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СМО БЕЗ ОТКАЗОВ НА GPSS .....	70
СЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ .....	71
<b>ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ</b> .....	72
МОДЕЛЬ РАБОТЫ ПОСТА ДПС .....	72
МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ .....	76
<b>СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА СИСТЕМ</b> .....	81
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	96

## ВВЕДЕНИЕ

*Моделирование – это исследование объектов познания на их моделях; построение и изучение моделей реально существующих предметов и явлений (живых и неживых систем, инженерных конструкций, разнообразных процессов - физических, химических, биологических, социальных) и конструируемых объектов. Моделирование применяется для определения, уточнения характеристик исследуемых объектов, рационализации способов их построения и в других аналогичных случаях.*

*Моделирование как познавательный приём неотделимо от развития знания.*

По существу, моделирование как форма отражения действительности зародилось в античную эпоху одновременно с возникновением научного познания. Однако в отчётливой форме (хотя без употребления самого термина) моделирование начинает широко использоваться в эпоху Возрождения. Так, например, известные итальянские архитекторы и скульпторы пользовались моделями проектируемых ими сооружений.

Постепенно моделирование захватывало все новые области научных знаний, куда можно отнести техническое конструирование, строительство и архитектуру, астрономию, физику, химию, биологию и, наконец, общественные науки, в том числе, экономику.

Особое развитие как метода научного познания моделирование получило в XX веке. Но следует отметить, что отсутствовала единая система понятий, единая терминология. И лишь недавно роль моделирования, как идеального метода научного познания, стала осознаваться человечеством.

Термин «модель» имеет различные смысловые значения. По отношению к познанию *модель - это такой материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе исследования замещает объект-оригинал так, что его непосредственное изучение дает новые знания об объекте-оригинале.*

Как уже отмечалось выше, под моделированием понимается процесс построения, изучения и применения моделей. Моделирование тесно связано с такими категориями, как **абстракция** - метод научного исследования, основанный на том, что при изучении некоторых явлений или процессов учитываются их существенные стороны и признаки, что позволяет упрощать картину изучаемого явления; **аналогия** - вид умозаключения, при котором знание, полученное при изучении одного объекта, переносится на менее изученный другой объект, сходный с ним; **гипотеза** - основание, предположение. Процесс моделирования обязательно включает и построение абстракций, и умозаключения по аналогии, и конструирование научных гипотез.

*Главная особенность моделирования состоит в том, что модель выступает как своеобразный инструмент познания, который исследователь ставит между собой и объектом и с помощью которого изучает интересующий его объект.* Именно эта особенность метода моделирования определяет специфические формы использования абстракций, аналогий, гипотез, других категорий и методов познания.

Необходимость использования метода моделирования определяется тем, что многие объекты (или проблемы, относящиеся к этим объектам) непосредственно исследовать или вовсе невозможно, или же это исследование требует много времени и средств.

*Компьютерное моделирование позволило снять ряд проблем в моделировании, открыло новые, широкие перспективы в моделировании объектов, процессов и позволило выйти на новый качественный уровень построения и исследования моделей.*

## СИСТЕМЫ

### ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Система** есть совокупность взаимосвязанных элементов, обособленная от среды и взаимодействующая с ней как единое целое. Это определение подчеркивает разнообразие свойств системы, в данном случае, выделение системы из среды и взаимодействие с ней.

Однако целевое предназначение системы является ее главным свойством. В этом случае **система есть совокупность взаимодействующих элементов, объединенных единством цели**. Система - это средство достижения цели или все то, что необходимо для достижения цели (элементы, отношения, структура, работа, ресурсы) в некотором заданном множестве объектов (операционной среде).

**Подсистема** - часть системы с некоторыми связями и отношениями. Любая система состоит из подсистем, подсистема любой системы может быть сама рассмотрена как система. Границы рассматриваемой системы определяются ресурсами и окружением.

**Пример.** Наука - система, обеспечивающая получение, проверку, фиксацию (хранение), актуализацию знаний общества. Наука имеет подсистемы: математика, информатика, физика, экономика и др. Любое знание существует лишь в форме систем (систематизированное знание). Теория - наиболее развитая система их организации, позволяющая не только описывать, но и объяснять, прогнозировать события, процессы.

**Состояние системы** – совокупность характеристик и показателей системы в определенный фиксированный момент времени (фиксация доступных системе ресурсов: материальных, энергетических, информационных, пространственных, временных, людских, организационных, определяющих ее отношение к ожидаемому результату).

**Цель** - несуществующее, но желаемое, с точки зрения **задачи** или рассматриваемой **проблемы**, состояние системы, которое позволяет решать проблему при данных ресурсах, это описание, представление некоторого предпочтительного с точки зрения поставленной цели и доступных ресурсов **состояния системы**.

**Пример.** Основные социально-экономические цели общества: экономический рост; полная трудовая занятость населения; экономическая эффективность производства; стабильный уровень цен; экономическая свобода производителей и потребителей; справедливое распределение ресурсов и благ; социально-экономическая обеспеченность и защищенность; торговый баланс на рынке; справедливая налоговая политика.

**Задача** - некоторое множество исходных посылок (входных данных к **задаче**), описание цели, определенной над множеством этих данных, и описание возможных стратегий достижения этой цели или возможных промежуточных состояний исследуемого объекта.

Решение **задачи** - описание достижения указанной **цели**; решением **задачи** называют и сам процесс нахождения этого состояния.

**Проблема** – описание ситуации, в которой определены **цель**, достижимые результаты, ресурсы и стратегия достижения цели (решения). Проблема включает ряд задач.

**Описание системы** - это идентификация определяющих элементов и подсистем, их взаимосвязей, целей, функций и ресурсов, описание допустимых **состояний системы**.

Если входные посылки, **цель**, условие **задачи**, решение плохо (частично) описываемы, то эти **задачи** называются **плохо формализуемыми**. Сложность их исследования заключается в необходимости учета различных, часто и противоречивых критериев определения, оценки решения задачи.

**Пример. Плохо формализуемыми** будут, например, задачи восстановления «размытых» текстов, изображений, составления учебного расписания в любом большом вузе, составления «формулы измерения интеллекта», описания функционирования мозга, социума, перевода текстов с одного языка на другой с помощью ЭВМ и др.

**Структура** - совокупность необходимых и достаточных для достижения цели отношений между элементами системы или совокупность элементов и связей между ними.

**Пример.** Последовательная **структура** используется при организации конвейерных вычислений на суперкомпьютерах (конвейерных вычислительных **структурах**). Сетевая **структура** (в частности, типа «бабочка») используется для организации вычислений специализированных **структур**, в частности, для быстрого преобразования Фурье, которое используется для обработки спутниковой информации и во многих других отраслях. Древовидные сети подвержены влиянию переменных задержек, когда данные из всех узлов одного поддерева должны быть переданы на другое поддерево. Двумерные решетки

(матрицы) часто применяются для обработки изображений. Матричная **структура** - гиперкуб используется для связи каждого из  $2^n$  узлов с каждым и организации их независимой работы по выполнению отдельных частей программы (**задачи**); в частности, для игры в шахматы используется компьютер такой архитектуры.

**Структура** является связной, если возможен обмен ресурсами между любыми двумя подсистемами системы (предполагается, что есть обмен  $i$ -й подсистемы с  $j$ -й подсистемой и  $j$ -й подсистемы с  $i$ -й).

Если **структура** или элементы системы плохо (частично) описываемы или определяемы, то такое множество объектов называется **плохо** или слабо **структурированным**. Таково большинство социально-экономических систем, обладающих **рядом специфических черт плохо структурируемых систем, а именно:**

- **мультиаспектностью** и взаимосвязанностью происходящих в них процессов (экономических, социальных и т.п.), невозможностью их структурирования, так как все происходящие в них явления должны рассматриваться в совокупности;

- **отсутствием достаточной информации** (как правило, количественной) о динамике процессов и применимостью лишь качественного анализа;

- **изменчивостью** и многовариантностью динамики процессов и другие.

**Пример.** Плохо структурируемы проблемы описания многих исторических эпох, проблем микромира, общественных и экономических явлений, например, динамика курса валют на рынке, поведения толпы и др. Плохо формализуемые и плохо структурируемые проблемы (системы) наиболее часто возникают на стыке различных наук, при исследовании синергетических процессов и систем.

Для **описания системы** важно знать, какую она имеет **структуру** (строение), функции (работы) и связи (ресурсы) с окружением.

#### **Функционирование и развитие системы**

**Функционированием** называется деятельность (изменение состояний) системы во времени с определенной целью; **развитие** предполагает приобретение системой в процессе функционирования новых свойств.

При **функционировании** системы не происходит изменения инфраструктуры системы; при **развитии** системы ее инфраструктура качественно изменяется, **развитие** связано с накоплением и усложнением информации, ее организации.

**Пример.** Информатизация страны в ее наивысшей стадии - всемерное использование различных баз знаний, экспертных систем, когнитивных методов и средств, моделирования, коммуникационных средств, сетей связи, обеспечение информационной и любой безопасности - это революционное изменение, **развитие** общества.

Компьютеризация общества, региона, организации без постановки новых актуальных проблем, т.е. «навешивание компьютеров на старые методы и технологии обработки информации» - это **функционирование**, а не **развитие**.

### **ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ СИСТЕМ**

**Системный подход** – методология специального научного познания и социальной практики, а также объяснительный принцип, в основе которого лежит исследование объектов как систем. Системный подход реализует представление сложного объекта в виде иерархической системы взаимосвязанных подсистем, позволяющих фиксировать целостные свойства объекта, его структуру и динамику.

Важным для системного подхода является определение структуры системы - совокупности связей между элементами системы, отражающих их взаимодействие. Структура системы может изучаться извне с точки зрения состава отдельных подсистем и отношений между ними, а также изнутри, когда анализируются отдельные свойства, позволяющие системе достигать заданной цели, т.е. когда изучаются функции системы. В соответствии с этим наметился ряд подходов к исследованию структуры системы с ее свойствами, к которым следует отнести структурный и функциональный.

**При структурном подходе** выявляется состав выделенных элементов системы  $S$  и связи между ними. Совокупность элементов и связей между ними позволяет судить о структуре системы. Она в зависимости от цели исследования может быть описана на разных уровнях рассмотрения. Наиболее общее описание структуры - это топологическое описание, позволяющее определить в самых общих понятиях составные части системы и хорошо формализуемое на базе теории графов.

**При функциональном описании** рассматриваются отдельные функции, т. е. алгоритмы поведения системы. Функциональный подход оценивает функции, которые выполняет система, причем под функцией понимается свойство, приводящее к достижению цели. Поскольку функция отображает свойство, а свойство отображает взаимодействие системы  $S$  с внешней средой  $E$ , то свойства могут быть выражены в виде некоторых характеристик элементов  $S_{ij}$  и подсистем  $S_i$  системы, либо системы  $S$  в целом.

Проявление функций системы во времени  $S(t)$ , т. е. функционирование системы, означает переход системы из одного состояния в другое, т. е. движение в пространстве состояний  $Z$ . При эксплуатации системы  $S$  весьма важно качество ее функционирования, определяемое показателем эффективности и являющееся значением критерия оценки эффективности. Система  $S$  может оцениваться либо совокупностью частных критериев, либо некоторым общим интегральным критерием.

Следует отметить, что **создаваемая модель  $M$  с точки зрения системного подхода также является системой**, т. е.  $S' = S'(M)$ . В моделях может сохраняться прямая аналогия явления. Применяют также модели, в которых нет прямой аналогии, а сохраняются лишь законы и общие закономерности поведения элементов системы  $S$ . Понимание взаимосвязей как внутри самой модели  $M$ , так и взаимодействия ее с внешней средой  $E$  в значительной степени определяется тем, на каком уровне находится наблюдатель.

**Классический подход.** Простой подход к изучению взаимосвязей между отдельными частями модели предусматривает рассмотрение их как отражение связей между отдельными подсистемами объекта. Процесс синтеза модели  $M$  на основе классического (индуктивного) подхода представляется следующим образом: реальный объект, подлежащий моделированию, разбивается на отдельные подсистемы, т. е. выбираются исходные данные  $D$  для моделирования и ставятся цели, отображающие отдельные стороны процесса моделирования. По отдельной совокупности исходных данных  $D$  ставится цель моделирования отдельной стороны функционирования системы, формируется некоторая компонента  $K$  будущей модели. Совокупность компонент объединяется в модель  $M$ .

Таким образом, **разработка модели  $M$  на базе классического подхода означает суммирование отдельных компонент в единую модель, причем каждая из компонент решает свои собственные задачи и изолирована от других частей модели.** Поэтому классический подход может быть использован для реализации сравнительно простых моделей, в которых возможно разделение и взаимно независимое рассмотрение отдельных сторон функционирования реального объекта. Отмечают две отличительные стороны классического подхода: наблюдается движение от частного к общему, создаваемая модель (система) образуется путем суммирования отдельных ее компонент, не учитывается возникновение нового системного эффекта.

С усложнением объектов моделирования возникла необходимость наблюдения их с более высокого уровня. В этом случае наблюдатель (разработчик) рассматривает данную систему  $S$  как некоторую подсистему какой-то метасистемы, т. е. системы более высокого ранга, и вынужден перейти на позиции **нового системного подхода**, который позволит ему построить не только исследуемую систему, решающую совокупность задач, но и создавать систему, являющуюся составной частью метасистемы.

**Системный подход** получил применение в системотехнике в связи с необходимостью исследования больших реальных систем, когда сказалась недостаточность, а иногда ошибочность принятия каких-либо решений. На возникновение системного подхода повлияли увеличивающееся количество исходных данных при разработке, необходимость



учета сложных стохастических связей в системе и воздействий внешней среды E. Все это заставило исследователей изучать сложный объект не изолированно, а во взаимодействии с внешней средой и в совокупности с другими системами некоторой метасистемы.

Системный подход позволяет решить проблему построения сложной системы с учетом всех факторов и возможностей, пропорциональных их значимости, на всех этапах исследования системы S и построения модели M'. **Системный подход означает, что каждая система S является интегрированным целым даже тогда, когда она состоит из отдельных разобщенных подсистем.** Таким образом, в основе системного подхода лежит рассмотрение системы как интегрированного целого, причем это рассмотрение при разработке начинается с главного - **формулировки цели функционирования.**

На основе исходных данных D, которые известны из анализа внешней системы, тех ограничений, которые накладываются на систему, исходя из возможностей ее реализации, и на основе цели функционирования формулируются исходные требования T к модели системы S. На базе этих требований формируются ориентировочно некоторые подсистемы П, элементы Э и осуществляется наиболее сложный этап синтеза - выбор В составляющих системы, для чего используются специальные критерии выбора.

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

**Предметная область** - раздел науки, изучающий предметные аспекты системных процессов и системные аспекты предметных процессов и явлений. Это определение можно считать системным определением предметной области.

**Системный анализ** - совокупность понятий, методов, процедур и технологий для изучения, описания, реализации явлений и процессов различной природы и характера, междисциплинарных проблем; это совокупность общих законов, методов, приемов исследования систем.

**Системный анализ** - методология исследования сложных, часто не вполне определенных проблем теории и практики.

Различают **три ветви науки**, изучающей системы:

- **системологию** (теорию систем) которая изучает теоретические аспекты и использует теоретические методы (теория информации, теория вероятностей, теория игр и др.);

- **системный анализ** (методологию, теорию и практику исследования систем), который исследует методологические, практические аспекты и использует практические методы (математическая статистика, исследование операций, программирование и другие);

- **системотехнику** (практику, технологию проектирования и исследования).

Общим у всех этих ветвей является системный подход, системный принцип исследования - рассмотрение изучаемой совокупности не как простой суммы составляющих (линейно взаимодействующих объектов), а как совокупности нелинейных и многоуровневых взаимодействующих объектов.

Любую **предметную область** также можно определить как системную.

**Пример. Информатика** - наука, изучающая информационно-логические и алгоритмические аспекты системных процессов, системные аспекты информационных процессов. Это определение можно считать системным определением информатики.

**Системный анализ** тесно связан с **синергетикой**. **Синергетика** - междисциплинарная наука, исследующая общие идеи, методы и закономерности организации (изменения структуры, ее пространственно-временного усложнения) различных объектов и процессов, инварианты (неизменные сущности) этих процессов. "Синергический" в переводе означает «совместный, согласованно действующий». Это теория возникновения новых качественных свойств, структур на макроскопическом уровне.

**Системный анализ** тесно связан и с философией. Философия дает общие методы содержательного анализа, а **системный анализ** - общие методы формального анализа **предметных областей**, выявления и описания, изучения их системных инвариантов.



**Системный анализ** предоставляет к использованию в различных науках, системах следующие **системные методы и процедуры**:

- **абстрагирование** и конкретизация;
- **анализ и синтез**, индукция и дедукция;
- **формализация** и конкретизация;
- **композиция** и декомпозиция;
- **линеаризация** и выделение нелинейных составляющих;
- **структурирование** и реструктурирование;
- **реинжиниринг**;
- **алгоритмизация**;
- **моделирование** и эксперимент;
- программное **управление и регулирование**;
- **распознавание** и идентификация;
- **кластеризация** и классификация;
- **экспертное оценивание** и тестирование;
- **верификация** и другие методы и процедуры.

Особый тип мышления - **системный**, присущий аналитику, который хочет не только понять суть процесса, явления, но и управлять им. Системный тип мышления отражает методологию системного подхода, основанную на теории систем.

**Предметное (предметно-ориентированное) мышление** - это метод (принцип), с помощью которого можно целенаправленно (как правило, с целью изучения) выявить и актуализировать, познать причинно-следственные связи и закономерности в ряду частных и общих событий и явлений. Часто это методика и технология исследования систем.

**Системный анализ** базируется на ряде **общих принципов**, среди которых:

- **принцип дедуктивной последовательности** - последовательного рассмотрения системы по этапам: от окружения и связей с целым до связей частей целого (принцип иерархической декомпозиции систем);
- **принцип интегрированного рассмотрения** - каждая система рассматривается как целое даже при рассмотрении лишь отдельных подсистем системы;
- **принцип согласования ресурсов и целей** рассмотрения, актуализации системы;
- **принцип бесконфликтности** - отсутствия конфликтов между частями целого, приводящих к конфликту целей целого и части.

**Системно в мире все**: практика и практические действия, знание и процесс познания, окружающая среда и связи с ней (в ней). **Системный анализ** как методология научного познания структурирует все это, позволяя исследовать и выявлять инварианты (особенно скрытые) объектов, явлений и процессов различной природы, рассматривая их общее и различное, сложное и простое, целое и части.

Любая человеческая интеллектуальная деятельность является по своей сути системной деятельностью, предусматривающей использование совокупности взаимосвязанных системных процедур на пути от постановки задачи, целей, планирования ресурсов к нахождению и использованию решений.

**Пример.** Любое экономическое решение должно базироваться на фундаментальных принципах **системного анализа**, экономики, информатики, управления и учитывать поведение человека в социально-экономической среде, т.е. должно базироваться на рациональных, социально и экономически обоснованных нормах поведения в этой среде.

Окружающий нас мир бесконечен в пространстве и во времени; человек существует конечное время, располагая при реализации цели конечными ресурсами (материальными, энергетическими, информационными, людскими, организационными, пространственными и временными).

Итак, расчлененность мышления на анализ, синтез и взаимосвязь этих частей является очевидным признаком системности познания.

## СИСТЕМА И УПРАВЛЕНИЕ

### **Функции и задачи управления системой:**

- **организация системы** - полное, качественное выделение подсистем, описание их взаимодействий и структуры системы (линейной, иерархической, сетевой или матричной);
- **прогнозирование поведения системы**, т.е. исследование будущего системы;
- **планирование** во времени, в пространстве, по информации ресурсов и элементов, структуры системы, необходимых и достаточных для достижения цели системы;
- **учет и контроль ресурсов**, приводящих к желаемым состояниям системы;
- **регулирование** - приспособление системы к изменениям внешней среды;
- **реализация** тех или иных спланированных состояний, решений.

### **Функции и задачи управления системой взаимосвязаны и взаимозависимы.**

**Пример.** Нельзя, например, осуществлять полное планирование в экономической системе без прогнозирования, учета и контроля ресурсов, без анализа спроса и предложения - основных регуляторов рынка. Экономика любого государства - всегда управляемая система, хотя подсистемы управления могут быть организованы по-разному, иметь различные элементы, цели, структуру, отношения.

По характеру управления, охвата подсистем и подцелей **управление может быть:**

- **стратегическое**, направленное на разработку стратегии поведения системы;
- **тактическое**, направленное на разработку тактики поведения системы.

**По времени управляющего воздействия системы могут быть долгосрочно и краткосрочно управляемые.**

Иногда отождествляют стратегическое и долгосрочное, тактическое и краткосрочное управление, но это не всегда верно.

**Пример.** Любая серьезная экономическая система стратегического управления должна включать в себя управляющую (информационную) подсистему, обрабатывающую стратегическую информацию об инновационных мероприятиях, инвестиционных условиях, о возможностях и состояниях рынков товаров, услуг, ценных бумаг, доступных ресурсах, финансовых условиях и критериях, принципах и методах управления. Такие системы **имеют следующие цели** и, соответствующие им, структуры, функции.

### **Управление:**

- **координацией** (Project Integration Management);
- **целями** (Project Scope Management);
- **временем** (Project Time Management);
- **стоимостью** (Project Cost Management);
- **качеством** (Project Quality Management);
- **людскими ресурсами** (Project Human Resource Management);
- **коммуникациями** (Project Communication Management);
- **рисками** (Project Risk Management);
- **поставками** (Project Procurement Management).

Все эти функции тесно переплетены между собой.

Выявление управляющих параметров и их использование для **управления системой** может также способствовать уменьшению сложности системы. В свою очередь, уменьшение сложности системы может сделать систему управляемой.

**Система называется устойчивой структурно** (динамически, вычислительно, алгоритмически, информационно), если она сохраняет тенденцию стремления к тому состоянию, которое наиболее соответствует целям системы.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Информация используется для управления и сама она подвержена управляющим воздействиям. Основная цель этих воздействий - поддержка информационных потоков, способствующих достижению поставленных целей при ограниченных материально-

энергетических, информационно-организационных, пространственно-временных ресурсах. Рассмотрим сказанное на примере маркетингового информационного управления.

**Пример. Маркетинговое информационное управление - планирование и прогнозирование поведения системы, корпорации на основе рыночной информации, информационных процессов и информационных технологий на рынке, в сфере бизнеса с учетом поведения и привычек покупателя и продавца, их интерактивного контакта, оперативной реакции.** Чтобы понять клиентов фирмы, ее конкурентов, дилеров и т.п., не обойтись без маркетинговых исследований.

Такие исследования нужны не только в коммерческих, но и в некоммерческих организациях: университет интересуется, какую репутацию он имеет в глазах абитуриентов, студентов; политическая партия, организация интересуется своим рейтингом, мнением потенциальных избирателей о ее кандидатах.

Технология проведения маркетингового исследования и интерпретация полученной информации **состоит из следующих процедур:**

- **определение проблемы**, целей и расстановки их приоритетов;
- **сбор и анализ** первичной информации;
- **анализ вторичной информации;**
- **рекомендации** и использование результатов.

**Определение проблемы** - формулирование предмета маркетингового исследования: проведение **информационного анализа** - какую информацию и для чего собирать?

**Анализ вторичной информации** - анализ не устаревших данных, которые были собраны ранее для целей, не связанных с решением исследуемой проблемы, особенно данных, собранных из независимых источников, которая, как правило, весьма достоверна.

**Возможные источники вторичной информации:** *планы* и финансовые *отчеты*; *данные* о сбыте; данные о *прибылях* и убытках; *счета* клиентов; данные о *запасах*; *результаты* предыдущих исследований; письменные *сообщения* (текущая информация); *жалобы* потребителей, *стандарты*; периодические *издания*; *книги*, монографии и др.

**Сбор и анализ первичных данных** - сбор и анализ актуальной, "свежей" информации для решения конкретной исследуемой проблемы. Здесь важно отвечать на следующие вопросы: кого или что следует исследовать? какая информация должна собираться? кому поручить сбор данных? какие методы сбора данных использовать? сколько будет стоить исследование? какова методика сбора данных? как долго собирать данные? когда и где собирать информацию? в какой форме собирать, как и где хранить информацию?

Рекомендации и использование результатов позволяют выработать и принимать решения. **Правильно, полно и корректно собранная информация позволяет маркетологам снижать финансовый риск; определять отношения потребителей; следить за внешней средой; координировать стратегию и тактику поведения; оценивать деятельность других и собственную; повысить доверие к рекламе; получать поддержку в решениях; подкреплять интуицию; улучшать эффективность и другие.**

Маркетинговые исследования - часть интегрированного информационного процесса, и на них воздействуют факторы окружающей среды (конкуренция, экономика и др.).

Во многих областях и в системном анализе большое значение имеет понятие «**информационная система**». Оно отождествляется с автоматизацией интеллектуальных работ, поиском информации, администрированием, экспертизой, принятием решений, управлением, накоплением знаний, обучением.

**Информационная система - система, в которой ее элементы, цель, ресурсы, структура (организация) рассматриваются на информационном уровне** хотя, естественно, имеются и другие уровни рассмотрения (энергетический, материальный уровень).

**Информационная система** имеет следующие **типы основных подсистем:**

- **информационного обеспечения** (данных);
- **интеллектуального обеспечения** (информации, знаний);
- **технического обеспечения** (аппаратуры);

- **технологического обеспечения** (технологии);
- **коммуникативного обеспечения** (интерфейса);
- **анализа и проектирования**;
- **оценки адекватности и качества, верификации**;
- **организационного взаимодействия и управления персоналом**;
- **логистики** (планирования и движения товаров и услуг).

**Информационная среда** - это среда, система и ее окружение из взаимодействующих **информационных систем**, включая и информацию в этих системах.

**Пример.** Можно выделить три основных подхода к использованию информационного менеджмента в социально-экономических системах.

«**Отношений с общественностью**» (PR - Public Relations, Пиар), при котором разрабатываются и используются системы управления социально-экономической информацией с целью создания более адекватной и благоприятной среды (включая и все виды ресурсов), общественного сознания для реализации интересов государства, монополии и человека, согласования их интересов, подчас противоречивых. Широко используются при этом методы опроса населения, изучения общественного мнения, рекламирования, прогнозирования и моделирования (для повышения устойчивости и регуляции систем).

«**Объединения достижений НТР и человека**», при котором разрабатываются и реализуются системы массового обучения достижениям НТР, новым информационным технологиям, делопроизводству и т.д. с целью адаптации человека к системам с возросшими техническими и технологическими возможностями, требованиями к качеству продукции и соотношению «качество – цена».

«**Организационного гуманизма**», при котором разрабатываются и реализуются культурно-образовательные, социально-психологические, гуманистические и материальные среды с целью раскрытия потенциальных возможностей и способностей.

**Пример.** Технологический и социально-экономический отрыв стран Запада и СНГ определяется, в первую очередь, не отсутствием у нас квалифицированных рабочих, хорошей образовательной системы, ресурсов, а отсутствием адекватной им системы информационного и экономического управления, его регулирования, а не саморегулирования (самоорганизации), недостаточным вниманием к информационному менеджменту. Реформы должны происходить не для обогащения небольшой группы населения, а для повышения благосостояния трудящейся массы (особенно среднего класса - базы любого государства), обеспечения его творческого и плодотворного труда. Это наиболее важно и в то же время трудно обеспечиваемо в условиях экономических реформ.

**Информационная система управления** - система, предназначенная для управления другой системой.

Различают основные **6 типов информационных систем управления** (тип определяется целью, ресурсами, характером использования и предметной областью):

- **диалоговая система обработки запросов** (Transaction Processing System) - для реализации текущих, краткосрочных, оперативных формализуемых процедур, например, обработки накладных, ведомостей, бухгалтерских счетов, складских документов;

- **система информационного обеспечения** (Information Provision System) - для подготовки информационных сообщений краткосрочного использования оперативного или стратегического характера, например, с использованием баз данных и структурированных, формализованных процедур;

- **система поддержки принятия решений** (Decision Support System) - для анализа (моделирования) реальной формализуемой ситуации, в которой менеджер должен принять некоторое решение; такие системы используются как в краткосрочном, так и в долгосрочном управлении оперативного или стратегического характера;

- **интегрированная, программируемая система принятия решения** (Programmed Decision System) предназначена для автоматического, в соответствии с критериями оценки, выбора решений; используются в краткосрочном и в долгосрочном управлении;



- **экспертная система** (Expert System) - информационная консультирующая и принимающая решения система; используется как в долгосрочном, так и в краткосрочном оперативном прогнозировании, управлении;

- **интеллектуальная система** или система, основанная на знаниях (Knowledge Based System). Поддерживает задачи принятия решения в сложных системах, где необходимо использование знаний в широком диапазоне, особенно в плохо формализуемых и плохо структурируемых системах, нечетких системах и при нечетких критериях принятия решения; эта система наиболее эффективно применима для сведения проблем долгосрочного, стратегического управления к проблемам тактического и краткосрочного характера.

**Фундаментальная ошибка** с неустраняемыми последствиями в **информационных системах - принятие неправильных стратегических решений и критериев оценки решений.**

**Пример.** На заре компьютеризации школ многие регионы приняли решение: как можно быстрее оснастить школы компьютерами; в результате многие из них затем не могли освободиться от несовершенной, неприспособленной для задач обучения техники (КУВТ, УКНЦ, ДВК и т.п.) и получить современную технику, так как фактически техника у них была. Стратегически правильным подходом в этой ситуации был бы подход по принципу: "подождём, пока схлынет мутная вода, затем пойдет чистая".

При построении (выборе, адаптации) **информационной системы** используют **две основные концепции, два основных подхода:**

- **ориентация на проблемы**, которые необходимо решать с помощью этой **информационной системы**, т.е. **проблемно-ориентированный подход** (индуктивный подход);

- **ориентация на технологию**, которая доступна в данной системе, среде, т.е. **технологически-ориентированный подход** (дедуктивный подход).

Выбор концепции зависит от стратегических (тактических) и(или) долгосрочных (краткосрочных) критериев, проблем, ресурсов.

**Если вначале** изучаются возможности имеющейся технологии, а после определяются актуальные проблемы, которые можно решить с их помощью, то необходимо опираться на технологически-ориентированный подход.

**Если же вначале** определяются актуальные проблемы, а затем внедряется технология, достаточная для решения этих проблем, то необходимо опираться на проблемно-ориентированный подход.

**Ошибки в выборе подхода** (проблем, технологии) могут привести не только к ошибочным стратегиям и (или) тактике, но и к полному краху системы.

При этом обе концепции построения **информационной системы** зависят друг от друга: внедрение новых технологий изменяет решаемые проблемы, а изменение решаемых проблем - приводит к необходимости внедрения новых технологий; и то, и другое влияет на принимаемые решения.

Дороговизна, важность, актуальность информации определяют цели и приоритеты в управлении **информационными системами (в информационных системах).**

Системное проектирование (разработка) и использование **информационной системы** должно пройти следующий **жизненный цикл информационной системы:**

- **предпроектный анализ** - опыт создания других аналогичных систем, прототипов, отличия и особенности разрабатываемой системы и др.;

- **внутрисистемный анализ** (анализ подсистем системы);

- **описание, представление системы** - описание цели, отношений, связей с окружающей средой, системных ресурсов: материальных, энергетических, информационных;

- **определение критериев** адекватности, эффективности и надежности;

- **функциональное описание** подсистем системы (описание моделей, алгоритмов функционирования подсистем);

- **макетирование (макетное описание) системы**, оценка взаимодействия подсистем системы (реализации подсистем с упрощенными описаниями, процедурами, и апробация взаимодействия этих макетов с целью удовлетворения системной цели);

- **тестирование системы** - реализация полноценных функциональных подсистем и критериев, оценка модели по сформулированным критериям;

- **функционирование системы**;

- **определение целей дальнейшего развития** системы и ее приложений;

- **сопровождение системы** - уточнение, модификация, расширение возможностей системы в режиме ее функционирования.

**Эти этапы - основные для информационного реинжиниринга систем.**

**Пример.** Для решения текущих задач ведения бизнеса с учетом разнородных корпоративных интересов используют системы планирования ресурсов предприятия (ERP), как правило, на основе удаленного («клиент-сервер») доступа к единой базе данных и единых, предопределенных бизнес-процессах, транзакциях, с открытой многоплатформенной архитектурой. Системы ERP позволяют различным организациям с различными информационными системами создавать общую интегрированную информационную систему, используя для этого опыт и решения, разработанные фирмой-поставщиком ERP.

**Пример.** Особенно актуален реинжиниринг бизнес-процессов (BRP), т.е. процесс реинтеграции и рационализации производственных процессов. Реинжиниринг - это не только уменьшение размерности и сложности системы, реструктуризация, сокращение числа уровней управления, стремление к автоматизации, а фундаментальный, системный пересмотр всей системы (т.е. ее проблем и ресурсов), с целью существенного улучшения показателей ее эффективности, устойчивости, рентабельности, жизнеспособности. Это веление времени, современного производства (товаров, услуг, знаний), так как проблемы часто (до реинжиниринга) необходимо было разделить на сотни более мелких, коллективы - на сотни более мелких рабочих групп, знания необходимо было привлекать как специализированные, так и более широкого диапазона, распределять ресурсы. Все это нужно согласовывать по времени, по пространству, по структуре (организации), и число менеджеров при этом резко возрастает.

**Пример.** Глобализация (рынков, производства, конкуренции и др.) предъявляет свои требования по сближению национальных систем менеджмента. Появилась новая парадигма (т.е. система определяющих концепций, взглядов) глобального менеджмента (GMP) или глобального телекоммуникационного менеджмента. Ее можно назвать системой стратегического глобального реинжиниринга, основанной на знаниях, горизонтальных связях, корпоративной динамике, ориентированной на клиента.

**Индустрия информационных систем** опирается на следующие процессы: **мультимедийность**; **дружественность**; **интеграция**; **открытость**; **распределенность**; **объектно-ориентированный** подход; **метабазирование** данных.

В последнее время рассматриваются (проектируются, разрабатываются и используются) так называемые **корпоративные информационные системы (КИС)**, т.е. информационные системы в масштабе корпорации, организации.

**Пример. Информационная системы:** пенсионных выплат населению, здравоохранения региона, биржевой деятельности.

**Разработка КИС включает следующие мероприятия:**

- **информационное обследование корпорации** с целью выяснения целей функционирования, элементов, структуры, направлений, приоритетов и задач деятельности, информационных потоков и технологий, возможностей корпорации, критериев оценки эффективности системы (результат этого этапа - проект информационной системы);

- **выбор одной из двух основных концепций** разработки информационной системы - проблемно-ориентированной или технологически-ориентированной (результат этого этапа - архитектура информационной системы, например, архитектура «клиент-сервер» с



удаленным сервером баз данных, а также инструментальное и другое обеспечение системы, например, ОС UNIX, ORACLE);

- **определение ключевых элементов**, подсистем, в частности, подсистемы управления корпоративной базой данных, подсистемы автоматизации делопроизводства, подсистемы согласования, принятия и контроля решений, подсистемы тренинга (Lotus Notes, Action Workflow, EDMS – Electronic Document Management Systems, CBR Express).

При разработке целей, определении ресурсов необходимо тесное взаимодействие управляющего, проектирующего, разрабатывающего и пользовательского звена системы.

**Главный лозунг разработки информационных систем:** "Разработка *информационной системы осуществляется не для внедрения (использования) информационной системы, а для обеспечения эффективного управления, функционирования, планирования и прогнозирования, эволюции системы, которую она информационно поддерживает*".

## **ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ**

### **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ**

Моделирование (в широком смысле) является основным методом исследований во всех областях знаний и научно обоснованным методом оценок характеристик сложных систем, используемым для принятия решений в различных сферах инженерной деятельности. Существующие и проектируемые системы можно эффективно исследовать с помощью математических моделей, реализуемых на современных компьютерах.

#### **МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Все то, на что направлена человеческая деятельность, называется объектом** (objection - предмет). Выработка методологии направлена на получение и обработку информации об объектах, которые существуют вне нашего сознания и взаимодействуют между собой и внешней средой.

**Обобщенно моделирование можно определить как метод опосредованного познания, при котором изучаемый объект-оригинал находится в некотором соответствии с другим объектом-моделью, причем модель способна в том или ином отношении замещать оригинал на некоторых стадиях познавательного процесса.**

**Стадии познания**, на которых происходит такая замена, а также формы соответствия модели и оригинала могут быть различными:

- **моделирование как познавательный процесс**, содержащий переработку информации, поступающей из внешней среды, о происходящих в ней явлениях, в результате чего в сознании появляются образы, соответствующие объектам;

- **моделирование, заключающееся в построении некоторой системы-модели** (второй системы), связанной определенными соотношениями подобия с системой-оригиналом (первой системой), причем в этом случае отображение одной системы в другую является средством выявления зависимостей между двумя системами, отраженными в соотношениях подобия, а не результатом изучения поступающей информации.

**Моделирование начинается с формирования предмета исследований - системы понятий, отражающей существенные для моделирования характеристики объекта.** Отличительной особенностью моделирования сложных систем является его многофункциональность и многообразие способов использования; оно становится неотъемлемой частью всего жизненного цикла системы.

#### **ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА В МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ**

В настоящее время при анализе и синтезе сложных (больших) систем используется системный подход, который отличается от классического подхода.

**Классический подход** рассматривает систему путем перехода *от частного к общему* и синтезирует систему путем слияния ее компонент, разрабатываемых отдельно.

В отличие от этого **системный подход** предполагает последовательный переход **от общего к частному**, когда в основе рассмотрения лежит цель, причем исследуемый объект выделяется из окружающей среды.

**Объект моделирования.** Специалисты по проектированию и эксплуатации сложных систем имеют дело с системами управления различных уровней, обладающими общим свойством - стремлением достичь некоторой цели. В зависимости от цели исследования могут рассматриваться разные соотношения между самим объектом S и внешней средой E. Таким образом, в зависимости от уровня, на котором находится наблюдатель, объект исследования может выделяться по-разному и могут иметь место различные взаимодействия этого объекта с внешней средой.

**Системный подход** - это элемент учения об общих законах развития природы и одно из выражений диалектического учения. Можно привести разные определения системного подхода, но наиболее правильно то, которое позволяет оценить познавательную сущность этого подхода при таком методе исследования систем, как моделирование. Поэтому весьма важно выделение самой системы S и внешней среды E из объективно существующей реальности и описание системы исходя из общесистемных позиций.

При системном подходе к моделированию необходимо прежде всего четко определить цель моделирования. Таким образом, применительно к вопросам моделирования цель возникает из требуемых задач моделирования, что позволяет подойти к выбору критерия и оценить, какие элементы войдут в создаваемую модель M. Поэтому необходимо иметь критерий отбора отдельных элементов в создаваемую модель.

#### **СТАДИИ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛЕЙ**

На базе системного подхода может быть предложена и некоторая последовательность разработки моделей, когда выделяют две основные стадии проектирования: макропроектирование и микропроектирование.

**На стадии макропроектирования** на основе данных о реальной системе S и внешней среде E строится модель внешней среды, выявляются ресурсы и ограничения для построения модели системы, выбирается модель системы и критерии, позволяющие оценить адекватность модели M реальной системы S. Построив модель системы и модель внешней среды, на основе критерия эффективности функционирования системы выбирают оптимальную стратегию управления, что позволяет реализовать возможности модели по воспроизведению отдельных сторон функционирования реальной системы S.

**Стадия микропроектирования** в значительной степени зависит от конкретного типа выбранной модели. В случае имитационной модели необходимо обеспечить создание информационного, математического, технического и программного обеспечения системы моделирования. На этой стадии можно установить основные характеристики созданной модели, оценить время работы с ней и затраты ресурсов для получения заданного качества соответствия модели процессу функционирования системы S.

Независимо от типа используемой модели M при ее построении необходимо руководствоваться **рядом принципов системного подхода**:

- **последовательное** продвижение по этапам и направлениям создания модели;
- **согласование** информационных, ресурсных и других характеристик;
- **соотношение** отдельных уровней иерархии в системе моделирования;
- **целостность** отдельных обособленных стадий построения модели.

Модель M должна отвечать заданной цели ее создания, поэтому отдельные части должны компоноваться взаимно, исходя из единой системной задачи. **Цель может быть сформулирована качественно**, тогда она будет обладать большей содержательностью и длительное время может отображать объективные возможности данной системы моделирования. **При количественной формулировке цели** возникает целевая функция, которая точно отображает наиболее существенные факторы, влияющие на достижение цели.

Построение модели относится к числу системных задач, при решении которых синтезируют решения на базе огромного числа исходных данных, на основе предложений

коллективов специалистов. Использование системного подхода в этих условиях позволяет не только построить модель реального объекта, но и на базе этой модели выбрать необходимое количество управляющей информации в реальной системе, оценить показатели ее функционирования и тем самым на базе моделирования найти наиболее эффективный вариант построения и выгодный режим функционирования реальной системы S.

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ**

С развитием системных исследований, с расширением экспериментальных методов изучения реальных явлений все большее значение приобретают абстрактные методы, появляются новые научные дисциплины, автоматизируются элементы умственного труда.

Большое значение при создании реальных систем S имеют математические методы анализа и синтеза, целый ряд открытий базируется на теоретических изысканиях. Однако основным критерием любой теории является практика, и даже сугубо математические, отвлеченные науки базируются в своей основе на фундаменте практических знаний.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ**

Одновременно с развитием теоретических методов анализа и синтеза совершенствуются и методы экспериментального изучения реальных объектов, появляются новые средства исследования. Однако эксперимент был и остается одним из основных и существенных инструментов познания. Подобие и моделирование позволяют по-новому описать реальный процесс и упростить экспериментальное его изучение. Совершенствуется и само понятие моделирования. Появились новые виды моделирования, в основе которых лежит постановка не только физических, но и математических экспериментов.

Познание реальной действительности является длительным и сложным процессом. Определение качества функционирования большой системы, выбор оптимальной структуры и алгоритмов поведения, построение системы S в соответствии с поставленной перед ней целью - основная проблема при проектировании современных систем, поэтому моделирование можно рассматривать как один из методов, используемых при проектировании и исследовании больших систем.

*Моделирование базируется на некоторой аналогии реального и мысленного эксперимента. Аналогия - основа для объяснения изучаемого явления, однако критерием истины может служить только практика.* Хотя современные научные гипотезы могут создаваться чисто теоретическим путем, но, по сути, базируются на широких практических знаниях. При объяснении реальных процессов выдвигаются гипотезы, для подтверждения которых ставится эксперимент, либо проводятся такие теоретические рассуждения, которые логически подтверждают их правильность. В широком смысле под экспериментом можно понимать некоторую процедуру организации и наблюдения каких-то явлений, которые осуществляются в условиях, близких к естественным, либо имитируют их.

*Различают пассивный эксперимент, когда исследователь наблюдает протекающий процесс, и активный, когда наблюдатель вмешивается и организует протекание процесса.* В последнее время распространен активный эксперимент, поскольку именно на его основе удается выявить критические ситуации, получить наиболее интересные закономерности, обеспечить возможность повторения эксперимента.

В основе любого вида моделирования лежит некоторая модель, имеющая соответствие, базирующееся на некотором общем качестве, которое характеризует реальный объект. Объективно реальный объект обладает некоторой формальной структурой, поэтому для любой модели характерно наличие некоторой структуры, соответствующей формальной структуре реального объекта, либо изучаемой стороне этого объекта.

В основе моделирования лежат информационные процессы, поскольку само создание модели M базируется на информации о реальном объекте: в процессе реализации модели получается информация о данном объекте; в процессе эксперимента с моделью вводится управляющая информация; существенное место занимает обработка полученных результатов и тому подобное.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ

В качестве объекта моделирования выступают сложные организационно-технические системы, которые можно отнести к классу больших систем. Более того, по своему содержанию и созданная модель  $M$  также становится системой  $S(M)$  и тоже может быть отнесена к классу больших систем, для которых характерно следующее.

**Цель функционирования** представляет собой дерево целей с выделением главной основной цели для исследования различных сторон функционирования реального объекта.

**Сложность модели** определяется совокупностью множества отдельных элементов и связей между ними, объединенных в отдельные функциональные подсистемы и иерархически упорядоченные.

**Целостность создаваемой модели** определяется сложной взаимосвязью элементов и подсистем друг с другом.

**Неопределенность системы.** Основной характеристикой неопределенности служит такая мера информации, как энтропия, позволяющая в ряде случаев оценить количество управляющей информации, необходимой для достижения заданного состояния системы. При моделировании основная цель - получение требуемого соответствия модели реальному объекту и в этом смысле количество управляющей информации в модели можно также оценить с помощью энтропии и найти то предельное минимальное количество, которое необходимо для получения требуемого результата с заданной достоверностью.

**Поведенческая страта**, которая позволяет оценить эффективность достижения системой поставленной цели. Поведенческая страта рассмотрения системы позволяет применительно к модели  $M$  оценить эффективность построенной модели на основе точности и достоверности полученных при этом результатов.

**Адаптивность модели.** Применительно к модели существенна возможность ее адаптации в широком спектре возмущающих воздействий, а также изучение поведения модели в изменяющихся условиях, близких к реальным.

**Организационная структура системы моделирования**, которая во многом зависит от сложности модели и степени совершенства средств моделирования. Необходимы оптимальная организационная структура комплекса технических средств, информационного, математического и программного обеспечения системы моделирования  $S'(M)$ .

**Управляемость модели**, вытекающая из необходимости обеспечивать управление со стороны исследователей для получения возможности рассмотрения протекания процесса в различных условиях, имитирующих реальные. В этом смысле наличие многих управляемых параметров и переменных модели в реализованной системе моделирования дает возможность поставить широкий эксперимент и получить обширный спектр результатов.

**Возможность развития модели**, которая, исходя из современного уровня науки и техники, позволяет создавать мощные системы моделирования  $S(M)$  исследования многих сторон функционирования реального объекта. Необходимо предусматривать возможность развития системы моделирования как по горизонтали в смысле расширения спектра изучаемых функций, так и по вертикали в смысле расширения числа подсистем.

## МОДЕЛИ и МОДЕЛИРОВАНИЕ

**Модель и моделирование** - универсальные понятия познания в любой профессиональной области, познания систем, процессов, явлений.

**Модели и моделирование** объединяют специалистов различных областей, работающих над решением проблем, независимо от того, где эта **модель** и результаты **моделирования** будут применены. Вид **модели** и методы ее исследования больше зависят от информационно-логических связей элементов и подсистем моделируемой системы, ресурсов, связей с окружением, используемых при **моделировании**, а не от конкретной природы, конкретного наполнения системы.

Построение **модели** - системная задача, требующая анализа и синтеза исходных данных, гипотез, теорий, знаний специалистов. Системный подход позволяет не только



построить *модель* реальной системы, но и использовать эту *модель* для оценки (например, эффективности управления, функционирования) системы.

*Модель - объект или описание объекта, системы для замещения (при определенных условиях предложениях, гипотезах) одной системы (оригинала) другой системой для лучшего изучения оригинала или воспроизведения каких-либо его свойств.*

*Модель - результат отображения одной структуры (изученной) на другую (малоизученную).* Отображая физическую систему (объект) на математическую систему (например, математический аппарат уравнений), получим физико-математическую *модель* системы или математическую *модель* физической системы. Любая *модель* строится и исследуется при определенных допущениях, гипотезах.

*Пример.* Рассмотрим физическую систему: тело массой  $m$ , скатывающееся по наклонной плоскости с ускорением  $a$ , на которое воздействует сила  $F$ . Исследуя такие системы, Ньютон получил математическое соотношение:  $F = ma$ . Это математическая *модель* физической системы. При описании этой системы (построении этой *модели*) приняты следующие гипотезы: поверхность идеальна (т.е. коэффициент трения равен нулю); тело находится в вакууме (т.е. сопротивление воздуха равно нулю); масса тела неизменна; тело движется с одинаковым постоянным ускорением в любой точке.

*Пример.* Физиологическая система - система кровообращения человека - подчиняется некоторым законам термодинамики. Описывая эту систему на физическом (термодинамическом) языке балансовых законов, получим физическую, термодинамическую *модель* физиологической системы. Если записать эти законы на математическом языке, то получим математическую *модель* системы кровообращения. Назовем ее физико-математической *моделью*.

*Пример.* Совокупность предприятий функционирует на рынке, обмениваясь товарами, сырьем, услугами, информацией. Если описать экономические законы, правила их взаимодействия на рынке с помощью математических соотношений, например, системы алгебраических уравнений, где неизвестными будут величины прибыли, получаемые от взаимодействия предприятий, а коэффициентами уравнения будут значения интенсивностей таких взаимодействий, то получим математическую *модель* экономической системы предприятий на рынке.

*Пример.* Если банк выработал стратегию кредитования, смог описать ее с помощью экономико-математических *моделей* и прогнозирует свою тактику кредитования, то он имеет большую устойчивость и жизнеспособность.

Слово "*модель*" (modelium) означает "мера", "способ", "сходство с какой-то вещью".

*Моделирование* базируется на математической теории подобия, согласно которой абсолютное подобие может иметь место лишь при замене одного объекта другим точно таким же. При *моделировании* большинства систем абсолютное подобие невозможно, и основная цель *моделирования* – *модель*, отображающая функционирование моделируемой системы.

*Модели*, если отвлечься от областей, сфер их применения, бывают трех типов: *познавательные, прагматические и инструментальные.*

*Познавательная модель* - форма организации и представления знаний, средство соединения новых и старых знаний. *Познавательная модель*, как правило, является теоретической *моделью*.

*Прагматическая модель* - средство организации практических действий, рабочего представления целей системы для ее управления. Это, как правило, прикладные *модели*.

*Инструментальная модель* - средство построения, исследования и/или использования *прагматических* и/или *познавательных моделей*.

*Познавательные* отражают существующие, а *прагматические* - хоть и не существующие, но желаемые и, возможно, исполнимые отношения и связи.

*По уровню, «глубине» моделирования модели* бывают:

- **эмпирические** - на основе эмпирических фактов, зависимостей;
- **теоретические** - на основе математических описаний;
- **смешанные**, полуэмпирические - на основе эмпирических зависимостей и математических описаний.

**Проблема моделирования состоит из трех задач:**

- **построение модели** (эта задача менее формализуема и конструктивна, в том смысле, что нет алгоритма для построения **моделей**);
- **исследование модели** (эта задача более формализуема, имеются методы исследования различных классов **моделей**);
- **использование модели** (конструктивная и конкретизируемая задача).

**Модель**  $M$ , описывающая систему  $S(x_1, x_2, \dots, x_n; R)$ , имеет вид:  $M=(z_1, z_2, \dots, z_m; Q)$ , где  $z_i \in Z, i=1, 2, \dots, n, Q, R$  - множества отношений над  $X$  - множеством входных, выходных сигналов и состояний системы,  $Z$  - множество описаний, представлений элементов и подмножеств  $X$ .

Схема построения **модели**  $M$  системы  $S$  с входными сигналами  $X$  и выходными сигналами  $Y$  изображена на рисунке 1.

Если на вход  $M$  поступают сигналы из  $X$  и на выходе появляются сигналы  $Y$ , то задан закон, правило  $f$  функционирования **модели**, системы.

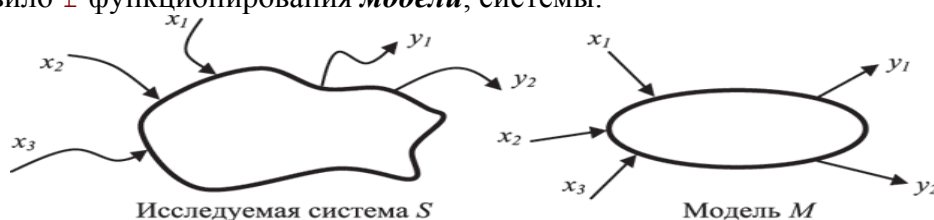


Рисунок 1 - Схема построения модели

**Моделирование** - это универсальный метод получения, описания и использования знаний. Он используется в любой профессиональной деятельности. В современной науке и технологии роль и значение **моделирования** усиливается, актуализируется проблемами, успехами других наук. **Моделирование** реальных и нелинейных систем живой и неживой природы позволяет перекидывать мостики между нашими знаниями и реальными системами, процессами, в том числе и мыслительными.

## КЛАССИФИКАЦИЯ И СВОЙСТВА МОДЕЛЕЙ

### КЛАССИФИКАЦИЯ

**Модель** называется **статической**, если среди параметров, участвующих в ее описании, нет временного параметра. **Статическая модель** в каждый момент времени дает лишь «фотографию» системы, ее срез.

**Пример.** Закон Ньютона  $F=am$  - это **статическая модель** движущейся с ускорением  $a$  материальной точки массой  $m$ . Эта **модель** не учитывает изменение ускорения от одной точки к другой.

**Модель динамическая**, если среди ее параметров есть временной параметр, т.е. она отображает систему (процессы в системе) во времени.

**Пример.** Модель  $S=gt^2/2$  - **динамическая модель** пути при свободном падении тела. **Динамическая модель** типа закона Ньютона:  $F(t)=a(t)m(t)$ .

**Модель дискретная**, если она описывает поведение системы только в дискретные моменты времени.

**Пример.** Если рассматривать только  $t=0, 1, 2, \dots, 10$  (с), то **модель**  $S_t=gt^2/2$  или числовая последовательность  $S_0=0, S_1=g/2, S_2=2g, S_3=9g/2, \dots, S_{10}=50g$  может служить **дискретной моделью** движения свободно падающего тела.

**Модель непрерывная**, если она описывает поведение системы для всех моментов времени из некоторого промежутка времени.

**Пример.** Модель  $S=gt^2/2, 0 < t < 100$  непрерывна на промежутке времени  $(0;100)$ .



**Модель имитационная**, если она предназначена для испытания или изучения возможных путей развития и поведения объекта путем варьирования некоторых или всех параметров *модели*.

**Пример.** Пусть *модель* экономической системы производства товаров двух видов 1 и 2, соответственно, в количестве  $x_1$  и  $x_2$  единиц и стоимостью каждой единицы товара  $a_1$  и  $a_2$  на предприятии описана в виде соотношения:  $a_1x_1 + a_2x_2 = S$ , где  $S$  - общая стоимость произведенной предприятием всей продукции (вида 1 и 2). Можно ее использовать в качестве *имитационной модели*, по которой можно определять (варьировать) общую стоимость  $S$  в зависимости от тех или иных значений объемов производимых товаров.

**Модель детерминированная**, если каждому входному набору параметров соответствует вполне определенный и однозначно определяемый набор выходных параметров; в противном случае - **модель недетерминированная, стохастическая** (вероятностная).

**Пример.** Приведенные выше физические *модели* - детерминированные. Если в *модели*  $S = gt^2/2$ ,  $0 < t < 100$  мы учли бы случайный параметр - порыв ветра с силой  $p$  при падении тела, например, так:  $S(p) = g(p)t^2/2$ ,  $0 < t < 100$ , то мы получили бы **стохастическую модель** (уже не свободного) падения.

**Модель функциональная**, если она представима в виде системы каких-либо функциональных соотношений.

**Пример.** Непрерывный, детерминированный закон Ньютона и *модель* производства товаров (см. выше) - функциональные.

**Модель теоретико-множественная**, если она представима с помощью некоторых множеств и отношений принадлежности им и между ними.

**Пример.** Пусть задано множество  $X = \{\text{Николай, Петр, Елена, Екатерина, Михаил, Татьяна}\}$  и отношения: Николай - супруг Елены, Екатерина - супруга Петра, Татьяна - дочь Николая и Елены, Михаил - сын Петра и Екатерины, семьи Михаила и Петра дружат друг с другом. Тогда множество  $X$  и множество перечисленных отношений  $Y$  могут служить **теоретико-множественной моделью** двух дружественных семей.

**Модель логическая**, если она представима предикатами, логическими функциями.

**Пример.** Совокупность двух логических функций вида:  $z = x \wedge y \vee x \wedge \bar{y}$ ,  $p = x \wedge y$  может служить математической моделью одноразрядного сумматора.

**Модель игровая**, если она описывает, реализует некоторую игровую ситуацию между участниками игры.

**Пример.** Пусть игрок 1 - добросовестный налоговый инспектор, а игрок 2 - недобросовестный налогоплательщик. Идет процесс (игра) по уклонению от налогов (с одной стороны) и по выявлению сокрытия уплаты налогов (с другой стороны). Игроки выбирают натуральные числа  $i$  и  $j$  ( $i, j \leq n$ ), которые можно отождествить, соответственно, со штрафом игрока 2 за неуплату налогов при обнаружении факта неуплаты игроком 1 и с временной выгодой игрока 2 от сокрытия налогов (в долгосрочном плане штраф за сокрытие может оказаться намного более ощутимым). Рассмотрим матричную игру с матрицей выигрышей порядка  $n$ . Каждый элемент этой матрицы  $A$  определяется по правилу  $a_{ij} = |i - j|$ . **Модель** игры описывается этой матрицей и стратегией уклонения и поимки.

**Модель алгоритмическая**, если она описана некоторым алгоритмом или комплексом алгоритмов, определяющим ее функционирование, развитие.

**Пример.** Моделью вычисления суммы бесконечного убывающего ряда чисел может служить алгоритм вычисления конечной суммы ряда до некоторой заданной степени точности. Алгоритмической **моделью** корня квадратного из числа  $x$  может служить алгоритм вычисления его приближенного сколь угодно точного значения по известной рекуррентной формуле.

**Модель структурная**, если она представима структурой данных или структурами данных и отношениями между ними.

**Пример.** Структурной моделью может служить описание (табличное, графовое, функциональное или другое) трофической структуры экосистемы. Постройте такую модель (одна из них была приведена выше).

**Модель графовая**, если она представима графом или графами и отношениями между ними.

**Модель иерархическая** (древовидная), если представима некоторой иерархической структурой (деревом).

**Пример.** Для решения задачи нахождения маршрута в дереве поиска можно построить, например, древовидную модель.

**Модель сетевая**, если она представима некоторой сетевой структурой.

**Пример.** Строительство нового дома включает последовательно – параллельные операции.

**Модель языковая, лингвистическая**, если она представлена некоторым лингвистическим объектом, формализованной языковой системой или структурой. Иногда такие модели называют вербальными, синтаксическими и т.п.

**Пример.** Правила дорожного движения - языковая, структурная модель движения транспорта и пешеходов на дорогах.

**Модель визуальная**, если она позволяет визуализировать отношения и связи моделируемой системы, особенно в динамике.

**Пример.** На экране компьютера часто пользуются визуальной моделью того или иного объекта, например, клавиатуры в программе - тренажере по обучению работе на клавиатуре.

**Модель натурная**, если она есть материальная копия объекта моделирования.

**Пример.** Глобус - натурная географическая модель земного шара.

**Модель геометрическая**, графическая, если она представима геометрическими образами и объектами.

**Пример.** Макет дома является натурной геометрической моделью строящегося дома. Вписанный в окружность многоугольник дает модель окружности. Именно она используется при изображении окружности на экране компьютера. Прямая линия является моделью числовой оси, а плоскость часто изображается как параллелограмм.

### ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЕЙ

**Тип модели** зависит от информационной сущности моделируемой системы, от связей и отношений его подсистем и элементов, а не от его физической природы.

**Пример.** Математическое описание (модель) динамики эпидемии инфекционной болезни, радиоактивного распада, усвоения второго иностранного языка, выпуска изделий производственного предприятия и т.д. являются одинаковыми с точки зрения их описания, хотя процессы различны.

**Границы между моделями** различного типа или же отнесение модели к тому или иному типу часто весьма условны. Можно говорить о различных режимах использования моделей - имитационном, стохастическом и т.д.

**Модель включает в себя:** объект  $O$ , субъект (не обязательный)  $A$ , задачу  $Z$ , ресурсы  $B$ , среду моделирования  $C$ :  
$$M = \langle O, Z, A, B, C \rangle.$$

**Основные свойства любой модели:**

- **целенаправленность** - модель всегда отображает некоторую систему, ее цель;
- **конечность** - модель отображает оригинал лишь в конечном числе его отношений и, кроме того, ресурсы моделирования конечны;
- **упрощенность** - модель отображает только существенные стороны объекта и, кроме того, должна быть проста для исследования или воспроизведения;
- **приблизительность** - действительность отображается моделью грубо или приблизительно;
- **адекватность** - модель должна успешно описывать моделируемую систему; наглядность, обозримость основных ее свойств и отношений;

- **доступность и технологичность** для исследования или воспроизведения;
- **информативность - модель** должна содержать достаточную информацию о системе (в рамках гипотез, принятых при построении **модели**) и должна давать возможность получить новую информацию;
- **полнота** - в **модели** должны быть учтены все основные связи и отношения, необходимые для обеспечения цели **моделирования**;
- **устойчивость - модель** должна описывать и обеспечивать устойчивое поведение системы, если даже она вначале является неустойчивой;
- **целостность - модель** реализует некоторую систему (т.е. целое);
- **замкнутость - модель** учитывает и отображает замкнутую систему необходимых основных гипотез, связей и отношений;
- **адаптивность - модель** может быть приспособлена к различным входным параметрам, воздействиям окружения;
- **управляемость** (имитационность) - **модель** должна иметь хотя бы один параметр, изменениями которого можно имитировать поведение моделируемой системы в различных условиях;
- **эволюционируемость** - возможность развития **моделей** (предыдущего уровня).

#### **Жизненный цикл моделируемой системы:**

- **сбор информации об объекте**, выдвижение гипотез, предмодельный анализ;
- **проектирование структуры и состава моделей** (подмоделей);
- **построение спецификаций модели**, разработка и отладка отдельных подмоделей, сборка **модели** в целом, идентификация (если это нужно) параметров **моделей**;
- **исследование модели** - выбор метода исследования и разработка алгоритма (программы) **моделирования**;
- **исследование адекватности**, устойчивости, чувствительности **модели**;
- **оценка средств моделирования** (затраченных ресурсов);
- **интерпретация, анализ результатов моделирования** и установление некоторых причинно-следственных связей в исследуемой системе;
- **генерация отчетов** и проектных (народно-хозяйственных) решений;
- **уточнение, модификация модели**, если это необходимо.

**Моделирование - метод системного анализа.** В системном анализе при модельном подходе исследования может совершаться одна методическая ошибка - построение корректных и адекватных **моделей** подсистем и их логически корректная увязка не дает гарантий корректности построенной таким способом **модели** всей системы. **Модель**, построенная без учета связей системы со средой и ее поведения по отношению к этой среде, может часто лишь служить еще одним подтверждением теоремы Геделя, утверждающего, что в сложной изолированной системе могут существовать истины и выводы, корректные в этой системе и некорректные вне её.

**Наука моделирования** состоит в разделении процесса **моделирования** (системы, **модели**) на этапы (подсистемы, подмодели), детальном изучении каждого этапа, взаимоотношений, связей, отношений между ними и затем эффективного описания их с максимально возможной степенью формализации и адекватности.

**Моделирование** (в значении «метод», «модельный эксперимент») рассматривается как особая форма эксперимента над копией (заместителем) оригинала. Здесь важен изоморфизм систем (оригинальной и модельной) - изоморфизм, как самой копии, так и знаний, с помощью которых она была предложена.

#### **Модели и моделирование применяются по основным направлениям:**

- **обучение** (как **моделям**, **моделированию**, так и самих **моделей**);
- **познание и разработка теории исследуемых систем** (с помощью каких-либо **моделей**, **моделирования**, результатов **моделирования**);
- **прогнозирование** (выходных данных, ситуаций, состояний системы);

- **управление** (системой в целом, отдельными подсистемами системы), выработка управленческих решений и стратегий;
- **автоматизация** (системы или отдельных подсистем системы).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### ПРОЦЕДУРЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Математическая модель описывается математическими структурами, математическим аппаратом: числами, буквами, геометрическими образами, отношениями, алгебраическими структурами. У математических моделей есть и дидактические аспекты - развитие модельного и математического стиля мышления, позволяющего вникать в структуру и внутреннюю логику моделируемой системы.

#### **Основные операции (процедуры) математического моделирования:**

**1 Линеаризация.** Пусть дана математическая модель  $M=M(X, Y, A)$ , где  $X$  - множество входов,  $Y$  - множество выходов,  $A$  - множество состояний системы. Схематически можно это изобразить так:  $X \rightarrow A \rightarrow Y$ . Если  $X, Y, A$  - линейные пространства (множества), а  $\Phi: X \rightarrow A, \Psi: A \rightarrow Y$  - линейные операторы (любые линейные комбинации) аргументов  $\Phi$  и  $\Psi$  преобразуют в соответствующие линейные комбинации  $a\Phi(x) + b\Phi i; (y)$  и  $a\Phi(x) + b\Psi(y)$ , то система (модель) называется **линейной**.

Нелинейные модели часто линеаризуют - сводят к **линейным моделям** с помощью линеаризующих процедур.

**Пример.** Применим операцию **линеаризации** к модели  $y=at^2/2, 0 \leq t \leq 4$ , которая является нелинейной (квадратичной). Для этого заменим один из множителей  $t$  на его среднее значение для рассматриваемого промежутка, т.е. на  $t=2$ . Такая очень грубая процедура **линеаризации** дает уже **линейную модель** вида  $y=2at$ . Более точную **линеаризацию** можно провести следующим образом: заменим множитель  $t$  не на среднее, а на значение в некоторой точке (это точка - неизвестна); тогда, как следует из теоремы о среднем из курса высшей математики, такая замена будет достаточно точна, но при этом необходимо оценить значение неизвестной точки. На практике используются достаточно точные и тонкие процедуры **линеаризации**.

**2 Идентификация.** Пусть  $M=M(X, Y, A), A=\{a_i\}, a_i=(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ik})$  - вектор состояния объекта (системы). Если вектор  $a_i$  зависит от некоторых неизвестных параметров, то задача **идентификации** (модели, параметров модели) состоит в определении по некоторым дополнительным условиям, например, экспериментальным данным, характеризующим состояние, системы в некоторых случаях. **Идентификация** - задача построения по результатам наблюдений математических моделей некоторого типа, адекватно описывающих поведение системы. Если  $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  - некоторая последовательность сообщений, получаемых от источника информации о системе,  $M=\{m_1, m_2, \dots, m_z\}$  - последовательность моделей, описывающих  $S$ , среди которых, возможно, содержится оптимальная модель, то **идентификация** модели  $M$  означает, что последовательность  $S$  позволяет различать по рассматриваемому критерию адекватности две разные модели в  $M$ . Последовательность сообщений  $S$  назовем информативной, если она позволяет различать разные модели в  $M$ . Цель **идентификации** - построение надежной, адекватной, эффективно функционирующей гибкой модели на основе минимального объема информативной последовательности сообщений. Наиболее часто используемые методы **идентификации** систем (параметров систем): метод наименьших квадратов, метод максимального правдоподобия, метод байесовских оценок, метод марковских цепных оценок, метод эвристик, экспертное оценивание и другие.

**Пример.** Применим операцию **идентификации** параметра  $a$  в модели предыдущего примера. Для этого необходимо задать дополнительно значение  $y$  для некоторого  $t$ ,



например,  $y=6$  при  $t=3$ . Тогда из модели получаем:  $6=9a/2$ ,  $a=12/9=4/3$ . Идентифицированный параметр  $a$  определяет следующую модель  $y=2t^2/3$ . Методы *идентификации* моделей могут быть несоизмеримо сложнее, чем приведенный прием.

### **3 Оценка адекватности (точности) модели.**

**Пример.** *Оценим адекватность* (точность) модели  $y=at^2/2$ ,  $0 \leq t \leq 4$ , полученной в результате *линеаризации* выше. В качестве меры (критерия) адекватности рассмотрим привычную меру - абсолютное значение разности между точным (если оно известно) значением и значением, полученным по модели (почему берется по модулю?). Отклонение точной модели от линеаризованной будет в рамках этого критерия равно  $|at^2/2 - 2at|$ ,  $0 \leq t \leq 4$ . Если  $a > 0$ , то, оценить с помощью производной, эта погрешность будет экстремальна при  $t=2a$ . Например, если  $a=1$ , то эта величина не превосходит 2. Это достаточно большое отклонение, и можно заключить, что наша линеаризованная модель в данном случае не является адекватной (как исходной системе, так и нелинеаризованной модели).

### **4 Оценка чувствительности модели** (к изменениям входных параметров).

**Пример.** Из предыдущего примера следует, что чувствительность модели  $y=at^2/2$ ,  $0 \leq t \leq 4$  такова, что изменение входного параметра  $t$  на 1% приводит к изменению выходного параметра  $y$  на более, чем 2%, т.е. эта модель является чувствительной.

**5 Вычислительный эксперимент** по модели. Это эксперимент, осуществляемый с помощью модели на ЭВМ с целью определения, прогноза тех или иных состояний системы, реакции на те или иные входные сигналы. Это процедура часто отождествляется с компьютерным моделированием.

### **Сложности, трудности использования математического моделирования:**

- *традиционное описание модели* системами математических уравнений, соотношений, когда большинство плохо структурированных и плохо формализуемых систем описываются с помощью экспертных данных, эвристических и имитационных процедур, интегрированных пакетов программ, графических образов и т.п.;

- существующие средства описания и представление моделей на ЭВМ *не учитывают специфику моделирования*, нет единого представления моделей, генерации новых моделей по банку моделей;

- *недооценка возможностей компьютера*, который может делать больше, чем простая реализация алгоритма, отсутствие доступа к опыту моделирования на ЭВМ.

**В базовой пятерке:** система (исследуемая среда) - модель (описание среды) - алгоритм (программа) - компьютер (компьютерная технология) - пользователь (выработка решения) при компьютерном моделировании главную роль играет алгоритм (программа) и компьютер (компьютерная технология).

**Пример.** При имитационном моделировании (при отсутствии строгого и формально записанного алгоритма) главную роль играют технология и средства моделирования; аналогичная ситуация наблюдается в когнитивной графике.

**Модель не эквивалентна программе, а моделирование не сводится к программированию.**

### **Основные функции компьютера при моделировании систем:**

- исполнение *роли вспомогательного средства* для решения задач, доступных и для обычных вычислительных средств, алгоритмов, технологий;

- исполнение *роли средства постановки и решения новых задач*, не решаемых традиционными средствами, алгоритмами, технологиями;

- исполнение *роли средства конструирования компьютерных* обучающих и моделирующих *сред* типа: «обучающий - компьютер – обучаемый», «обучающий - компьютер - группа обучаемых», «компьютер - обучаемый – компьютер»;

- исполнение *роли средства моделирования для получения новых знаний*;

- исполнение *роли «обучения» новых моделей* (самообучение моделей).

**Компьютерное моделирование** - основа представления знаний в ЭВМ (построения различных баз знаний). Компьютерное моделирование для создания новой информации использует любую информацию, которую можно актуализировать с помощью ЭВМ. **Прогресс в моделировании** связан с разработкой систем компьютерного моделирования, которые поддерживает весь жизненный цикл модели, а **прогресс в информационных технологиях** - с актуализацией опыта моделирования на компьютере, с созданием банков моделей, методов и программных систем, позволяющих создавать новые модели из моделей банка. Автономные подмодели модели обмениваются информацией друг с другом через единую информационную шину - банк моделей, через базу знаний. Особенность компьютерных систем моделирования - их высокая интеграция и интерактивность. Часто эти компьютерные среды функционируют в режиме реального времени.

**Вычислительный эксперимент** - разновидность компьютерного моделирования.

Компьютерное моделирование и **вычислительный эксперимент** становятся новым инструментом, методом научного познания, новой технологией из-за возрастающей необходимости перехода от исследования **линейных** математических **моделей** систем (для которых достаточно хорошо известны или разработаны методы исследования, теория) к исследованию сложных и нелинейных математических моделей систем. Наши знания об окружающем мире - линейны и детерминированы, а процессы в окружающем мире - нелинейны и стохастичны".

### ЭТАПЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Компьютерное моделирование, от постановки задачи до получения результатов, включает следующие **этапы компьютерного моделирования**:

- **постановка**, формулировка задачи;
- **определение цели** и приоритетов моделирования;
- **сбор информации** о системе, объекте моделирования;
- **описание данных** (структуры, диапазона, источника);
- **анализ существующих аналогов** и подсистем;
- **анализ технических средств** моделирования (ЭВМ, периферия);
- **анализ программного обеспечения** (языки программирования, пакеты прикладных программ, инструментальные среды);
- **анализ математического обеспечения** (модели, методы, алгоритмы);
- разработка **структур данных**;
- разработка **входных и выходных спецификаций**, форм представления данных;
- **проектирование структуры и состава модели** (подмоделей);
- **исследование модели**, выбор методов исследования подмоделей;
- **сборка модели** в целом из подмоделей;
- **идентификация модели**, если в этом есть необходимость;
- формулировка используемых **критериев адекватности, устойчивости и чувствительности модели**;
- **программирование** (проектирование программы);
- выбор **метода тестирования** и тестов (контрольных примеров);
- **кодирование** на языке программирования (написание команд);
- **тестирование** и отладка;
- **оптимизация** программы;
- **оценка моделирования**, средств моделирования, адекватности моделирования;
- **оценка чувствительности** модели, устойчивости модели;
- **документирование**, описание задачи, целей, модели, метода, алгоритма;
- **создание инструкций** для пользователя;
- **сопровождение**, использование модели.

**Пример.** Математическое и компьютерное моделирование подробно, поэтапно, мы рассмотрим на примере следующей простой модели производства.



### **Этап 1 Содержательная постановка задачи**

Современное производство характерно тем, что часть производимой продукции (в стоимостном выражении) возвращается в виде инвестиций (т.е. части конечной продукции, используемой для создания основных фондов производства) в производство. При этом время возврата, ввода в оборот новых фондов может быть различным для различного рода производства. Необходимо смоделировать эту ситуацию и выявить динамику изменения величины основных фондов производства (капитала).

Сложность и многообразие, слабая структурированность и плохая формализуемость основных процессов, определяющих работу предприятий, не позволяют преобразовать процедуры принятия решений в экономической системе в полностью эффективные математические модели и алгоритмы прогнозирования. Поэтому целесообразно использование простых, но гибких и надежных процедур принятия решения.

### **Этап 2 Формулировка гипотез, построение, исследование модели**

Динамика изменения величины капитала определяется в нашей модели, в основном, простыми процессами производства и описывается так называемыми обобщенными коэффициентами амортизации (расхода фондов) и потока инвестиций (часть конечного продукта, используемого в единицу времени для создания основных фондов). Эти коэффициенты - относительные величины (оцениваются за единицу времени). Необходимо разработать и исследовать модель динамики основных фондов. Считаем при этом допустимость определенных гипотез, определяющих систему производства.

Пусть  $x(t)$  - величина основных фондов (капитала) в момент времени  $t$ , где  $0 \leq t \leq N$ . Через промежуток времени  $\Delta t$  она будет равна  $x(t+\Delta t)$ . Абсолютный прирост равен  $\Delta x = x(t+\Delta t) - x(t)$ . Относительный прирост будет равен  $\delta x = [x(t+\Delta t) - x(t)] / \Delta t$ .

#### **Примем следующие гипотезы:**

- **социально-экономические условия** производства достаточно хорошие и способствуют росту производства, а поток инвестиций задается в виде известной функции  $y(t)$ ;
- **коэффициент амортизации фондов** считается неизменным и равным  $m$ , и при достаточно малом значении  $\Delta t$ , изменение основных фондов прямо пропорционально текущей величине капитала, т.е.  $dx = y(t) - mx(t)$ .

Считая  $\Delta t \rightarrow 0$ , а также учитывая определение производной, получим из предыдущего соотношения следующее математическое выражение закона изменения величины капитала - математическую модель (дифференциальное уравнение) динамики капитала:

$$x'(t) = y(t) - mx(t), \quad x(0) = x_0,$$

где  $x(0)$  - начальное значение капитала в момент времени  $t=0$ .

Эта простейшая модель не отражает важного факта: социально-экономические ресурсы производства таковы, что между выделением инвестиций и их введением и использованием в выпуске новой продукции проходит время (лаг). Учитывая это, можно записать модель в виде

$$x'(t) = y(t-T) - mx(t), \quad x(0) = x_0.$$

Этой непрерывной, дифференциальной, динамической модели можно поставить в соответствие простую дискретную модель:  $x_{i+1} = x_i + y_j - mx_i$ ,  $x_0 = c$ ,  $i=0, 1, 2, \dots, n$ ,  $0 < j < n$ , где  $n$  - предельное значение момента времени при моделировании.

Дискретная модель следует из непрерывной при  $\Delta t = 1$ , при замене производной  $x'(t)$  на относительное приращение (это справедливо при малых значениях  $\Delta t$ ).

### **Этап 3 Построение алгоритма и программы моделирования**

Возьмем для простоты режим моделирования, когда  $m$ ,  $c$  - известны и постоянны,  $y$  - увеличивается на каждый следующий момент времени на 1%, а также рассмотрим наиболее простой алгоритм моделирования в укрупненных шагах.

Ввод входных данных для моделирования:  $c = x(0)$  - начальный капитал;  $n$  - конечное время моделирования;  $m$  - коэффициент амортизации;  $s$  - единица измерения времени;  $y$  - инвестиции.

Вычисление  $x_i$  от  $i=1$  до  $i=n$  по рекуррентной формуле, приведенной выше.

Поиск стационарного состояния - такого момента времени  $j$ ,  $0 \leq j \leq n$ , начиная с которого все  $x_j, x_{j+1}, \dots, x_n$  постоянны или изменяются на малую величину  $\varepsilon > 0$ .

Алгоритм, записанный на учебном алгоритмическом языке, имеет вид:

```

алг Производство (арг вещ m, c, n, рез вещ таб x[1:366], лит p, q);
дано | производство с основными фондами, изменяющимися по закону:
    | x[i+1]=x[i]+y-mx[i],   x[0]=c,   i=0, 1, 2, ..., n,   0<j<n,
    | t=i*h,   h=1 - шаг по времени (день),
    | i - текущий момент времени,
    | m - коэффициент амортизации,
    | x[0]=c - заданная начальная величина капитала,
    | y - увеличиваемая на 1% каждый раз величина инвестиций
надо | промоделировать динамику основных фондов, т.е. выяснить:
    | 1) чему они равны на момент времени n;
    | 2) наступает ли гибель предприятия, т.е. обращается ли капитал
    |     (основные фонды) в нуль при некотором t, и найти это t;
    | 3) наступает ли ситуация, когда капитал стабилизируется
нач | начало тела алгоритма
    | описание типов переменных
цел i, | i - переменная цикла прогноза (текущее время)
    j, | j - задаваемая величина лага
    k, | k - момент гибели предприятия (если есть)
    y | y - величина инвест., увелич. по закону y:=1.01*y
ввод (m, n, c, y) | ввод исходных данных
p:='предприятие не гибнет' | задаем начальное значение s
q:='капитал не стационарен' | задаем начальное значение q
x[0]:=c | начальное значение капитала (не нулевое)
i:=0 | задаем начальный момент времени моделирования
нц пока (i<=n) и (x[i]>0) | заголовок цикла прогноза капитала
    | тело цикла прогноза капитала
    x[i+1]=x[i]+y-mx[i] | вычисление прибыли в следующий момент
    y:=1.01*y | и увеличиваем на 1% - для следующего момента
    если x[i+1]<=0 | проверка гибели
        то | если гибнет, -выполн. блок погибшего предприятия
            p:="предприятие гибнет" | заменяем значение s
            k:=i-1 | и фиксируем время гибели
            нц для j от k до n | цикла вычисления всех
                x[j]=0 | остальных, нулевых значений прибыли
            кц | конец блок обработки погибшего предприятия
        если x[i+1]=x[i] | проверка стационарности прибыли
            то q:="капитал стационарен"|заменяем старое значение q
кц
кон.

```

#### **Этап 4 Проведение вычислительных экспериментов**

**Эксперимент 1** Поток инвестиций - постоянный и в каждый момент времени равен 10000. В начальный момент капитал - 1000000 р. Коэффициент амортизации - 0,0025. Найти величину основных фондов через 20 суток, если лаг равен 5 суток.

**Эксперимент 2** Основные фонды в момент времени  $t=0$  была равны 5000. Через какое время общая их сумма превысит 120000 р., если поток инвестиций постоянный и равен 200, а  $m=0,02$ ,  $T=3$ ?

**Эксперимент 3** Какую стратегию инвестиций лучше использовать, если величина инвестиций постоянная, в начальный момент капитал равен 100000, величина амортизации постоянная?

#### **Этап 5 Модификация (развитие) модели**

**Модификация 1** Коэффициент амортизации можно взять в форме  $m=r-sx(t)$ , где  $r$  - коэффициент обновления фондов,  $s$  - коэффициент устаревания фондов, причем  $0 \leq r, s \leq 1$ . При этом модель примет вид  $x'(t)=y(t-T)-rx(t)+sx^2(t)$ ,  $x(0)=x_0$

Этой непрерывной, дифференциальной, динамической модели можно поставить в соответствие простую дискретную модель:  $x_{i+1}=x_i + y_j - rx_i + sx_i^2$ ,  $x_0=c$ ,  $i=0, 1, 2, \dots, n$ ,  $0 < j < n$ , где  $n$  - предельное значение момента времени при моделировании. Поставить цели и исследовать непрерывную и дискретную модели.

**Модификация 2** Одна из моделей математической экономики задается уравнением:  $dz/dt = ((1-c) * z(t) + k(t-w) + a) l$ , где  $z(t)$  - функция, которая характеризует выпуск продукции,  $k$  - коэффициент капиталовложений,  $a$  - независимые расходы производства,  $l$  - скорость реакции выпуска на капиталовложения,  $c$  - постоянная спроса,  $w$  - запаздывание (лаг). Поставить цели и исследовать непрерывную и дискретную модели.

**Модификация 3** Для модели динамики фондов с переменным законом потока инвестиций: а) построить гипотезы, модель и алгоритм для моделирования; б) сформулировать планы **вычислительных экспериментов** по этой модели; в) реализовать алгоритм и планы экспериментов на ЭВМ. Математическое моделирование только в последнее время становится на технологическую основу, в связи с этим необходимо отметить особую роль обычно технологичного имитационного моделирования, которое позволяет нам проигрывать реальные ситуации, происходящие в системах, на их моделях.

**Пример.** Компьютерной (физической) моделью может служить простая модель броуновского движения, получаемая генерацией компьютером нового случайного положения точки на экране и траектории ее движения; при этом отметим, что сам "датчик случайных чисел компьютера" - это компьютерная модель, соответствующая математической модели распределения случайной величины (обычно нормального распределения) или так называемой функции распределения. Это распределение - псевдослучайное, получаемое по вполне детерминированному алгоритму.

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

### ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

#### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ

При моделировании сложных систем выделяют основные классы предметных областей, каждая из которых требует определенного подхода при исследовании с помощью моделей. Для этого необходимо создание математических моделей.

Модель объекта моделирования можно представить в виде множества входных воздействий –  $x_1, x_2, \dots$ ; воздействий внешней среды –  $v_1, v_2, \dots$ ; внутренних параметров системы –  $h_1, h_2, \dots$ ; выходных характеристик системы –  $y_1, y_2, \dots$ .

В общем случае  $x_i, v_i, h_k, y_j$  являются элементами непересекающихся подмножеств и содержат как детерминированные, так и стохастические составляющие.

Входные воздействия, воздействия внешней среды, внутренние параметры системы являются независимыми переменными (экзогенными), а выходные воздействия - зависимыми переменными (эндогенными). Процесс функционирования системы во времени описывается оператором  $F$ :  $Y(t) = F(X, V, H, t)$  – динамическая модель.

Для статических моделей математическая модель –  $Y = f(X, V, H)$ .

Для детерминированной модели –  $Y(t) = f(X, t)$ .

Если рассматривать процесс функционирования системы как последовательную смену состояний  $z_1(t), z_2(t), \dots$ , то  $Z(t) = \Phi(z_0, X, V, H, t)$ .

Тогда  $Y(t) = F(Z, t)$  или  $Y(t) = F[\Phi(z_0, X, V, H, t)]$ .

Таким образом, при построении математических моделей процессов функционирования систем можно выделить следующие **основные подходы: непрерывно-детерминированный, дискретно-детерминированный, дискретно-стохастический, непрерывно-стохастический**. В соответствии с этими подходами при моделировании систем используются типовые математические модели (схемы).

#### НЕПРЕРЫВНО-ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ (D - СХЕМЫ)

D - схемы представляют собой системы дифференциальных уравнений. Независимая переменная – время. Основой для создания и исследования таких моделей является теория автоматического управления.

Описывая процессы автоматического управления, представляют объект в виде двух систем: управляющей и управляемой. Экзогенные переменные – вектор входных воздей-

ствий  $x_i$ , вектор внешних воздействий  $v_i$ , вектор сигналов ошибки  $h_i'$ , вектор управляющих воздействий  $h_i''$ . Эндогенные переменные: вектор состояний системы  $z_i$ , вектор выходных переменных  $y_i$  (рисунок 2).

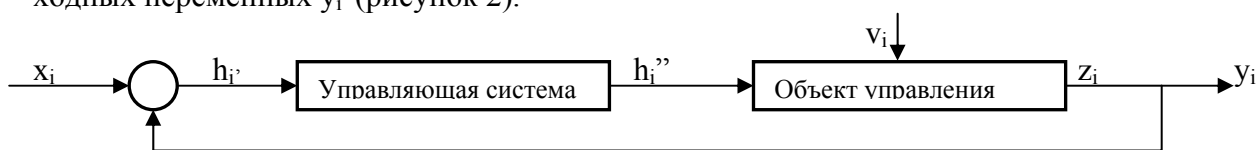


Рисунок 2 - Модель автоматического управления

Изменение состояния объекта осуществляется в соответствии с заданным законом управления. Такое изменение происходит в результате внешних факторов, например, вследствие управляющих или возмущающих воздействий.

В замкнутых системах автоматического регулирования управляющее воздействие формируется в непосредственной зависимости от управляемой величины. Связь входа системы с его выходом называется **обратной связью**. Сигнал обратной связи вычитается из задающего воздействия. Такая обратная связь называется **отрицательной**.

Такие системы способны поддерживать **экстремальное значение** некоторого критерия, характеризующего качество функционирования объекта. Критерием качества, который обычно называют **целевой функцией**, может быть либо непосредственно измеряемая физическая величина (например, температура, ток, напряжение, влажность, давление), либо КПД, производительность и др.

В качестве примеров технического управления можно привести системы дискретного действия или автоматы; системы стабилизации уровня звука, изображения или магнитной записи; управляемые комплексы летательных аппаратов, автопилоты и навигационные системы.

#### ДИСКРЕТНО-ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ (F-СХЕМЫ)

Это модели – автоматы. Теоретической основой исследования автоматов является теория автоматов. Система представляется в виде конечного автомата, потактно перерабатывающего входную дискретную информацию при изменении состояния автомата в выходную. Абстрактный конечный автомат отображает множество слов входного алфавита на множество слов выходного алфавита.

Конечные автоматы являются математической моделью устройств, перерабатывающих дискретную входную информацию в режиме «реального времени».

Задание конечного автомата:  $F = \langle Z, X, Y, \varphi, \psi, z_0 \rangle$ , где  $Z$ - конечное множество - алфавит состояний автомата;  $X$  - конечное множество - входной алфавит,  $Y$ - конечное множество - выходной алфавит;  $\varphi$  – функция переходов, определяющая последующее состояние, в которое переходит автомат из предыдущего состояния при подаче на вход символа входного алфавита;  $\psi$  – функция выходов выдает символ при переходе автомата из одного состояния в другое;  $z_0$  – начальное состояние автомата. Пару функций  $\varphi, \psi$  называют программой автомата и задают в виде таблицы. Конечные автоматы широко используются в вычислительной технике, например, в качестве сумматоров (рисунок 3). Диаграмма автомата SUM с входным алфавитом  $A = \{(00), (01), (10), (11), *\}$  и выходным алфавитом  $V = \{0, 1\}$ :

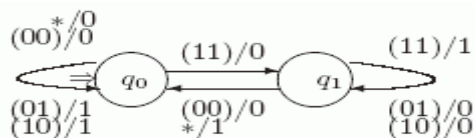


Рисунок 3 - Сумматор

#### ДИСКРЕТНО- СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ (P-СХЕМЫ)

Вероятностный автомат можно определить как дискретный потактный преобразователь информации с памятью, функционирование которого в каждом такте зависит от состояния памяти и может быть описано статистически.

Рассмотрим множество  $G$ , элементами которого являются всевозможные пары  $(x_i, z_s)$ , где  $x_i$  и  $z_s$  – элементы входного подмножества  $X$  и подмножества состояний  $Z$ .

Пусть  $\Phi$  – множество всевозможных пар  $(z_k, y_j)$ , где  $z_k$  и  $y_j$  – элементы подмножества состояний  $Z$  и выходного подмножества  $Y$ .

Потребуем, чтобы любой элемент множества  $G$  индуцировал на множестве  $\Phi$  некоторый закон распределения вида:

	Элементы из $\Phi$
Элементы из $G$	$(z_1, y_1) \dots (z_2, y_2) \dots \dots \dots (z_k, y_j)$
$(x_i, z_s)$	$p_{11} \dots p_{22} \dots \dots \dots p_{kj}$

При этом  $\sum p_{kj} = 1$ , где  $p_{kj}$  – вероятность перехода автомата в состояние  $z_k$  и появление на выходе сигнала  $y_j$ , если он был в состоянии  $z_s$  и на его вход поступил сигнал  $x_i$ .

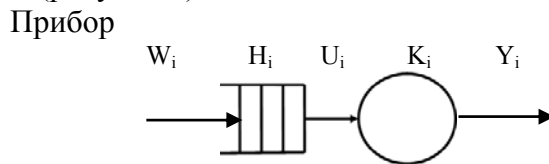
Число таких распределений, представленных в виде таблиц  $P$ , равно числу элементов множества  $G$ . Таким образом,  $P = \langle Z, X, Y, B \rangle$ .

**НЕПРЕРЫВНО-СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ (Q-СХЕМЫ)**

Модели используются для моделирования систем массового обслуживания (экономических, производственных, технических и других).

Характерным для таких систем является случайное появление заявок на обслуживание и завершение обслуживания в случайные моменты времени – стохастический характер процесса функционирования.

В элементарном акте обслуживания выделяют две основные составляющие: ожидание обслуживания заявки и собственно обслуживание заявки. Это изображается в виде прибора обслуживания (рисунок 4):



*Рисунок 4 – Прибор обслуживания*

где  $W_i$  – входной поток,  $U_i$  – поток обслуживания,  $Y_i$  – выходной поток,  $H_i$  – накопитель, очередь,  $K_i$  – канал обслуживания.

Процесс функционирования прибора можно представить как процесс изменения состояний его элементов во времени  $z_i(t)$ . Переход в новое состояние означает изменение количества заявок, которые в нем находятся. Вектор состояний имеет вид:  $Z_i = (z_{Hi}, z_{Ki})$ , где  $z_{Hi}$  – состояние накопителя,  $z_{Ki}$  – состояние канала.

Имеет место многоканальное обслуживание – если различные приборы соединены параллельно или многофазное обслуживание – если приборы соединены последовательно.

Таким образом, модель можно описать в виде:  $Q = \langle W, U, H, Z, R, A \rangle$ , где  $W$  – входной поток,  $U$  – поток обслуживания,  $H$  – параметры системы,  $Z$  – состояния системы,  $R$  – оператор сопряжения элементов системы,  $A$  – алгоритм обслуживания заявок.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Имитационное моделирование — это метод, позволяющий строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности. Такую модель можно «проиграть» во времени как для одного испытания, так и заданного их множества. При этом результаты будут определяться случайным характером процессов. По этим данным можно получить достаточно устойчивую статистику.

*Имитационное моделирование — это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью с достаточной точностью описывающей реальную систему, и с ней проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе.* Экспериментирование с моделью называют имитацией (имитация — это постижение сути явления, не прибегая к экспериментам на реальном объекте).

Имитационное моделирование — это частный случай математического моделирования. Существует класс объектов, для которых по различным причинам не разработаны



аналитические модели, либо не разработаны методы решения полученной модели. В этом случае математическая модель заменяется имитатором или имитационной моделью.

***Имитационная модель — логико-математическое описание объекта, которое может быть использовано для экспериментирования на компьютере в целях проектирования, анализа и оценки функционирования объекта.***

Вычислительный эксперимент с моделью объединяет в себе две составляющие: аналитическую и имитационную. Основной является задача структурных и динамических свойств моделей и разработка процедур работы с ними.

***Технологическая схема моделирования включает:***

- исследование предметной области и определение целей моделирования,
- аналитическое исследование модели, построение математической модели,
- разработку моделирующего алгоритма,
- построение машинной модели, имитационное исследование,
- анализ полученных результатов.

***Аналитические модели представляют собой некоторые функциональные соотношения и логические условия, явные зависимости, связывающие искомые величины с параметрами системы и начальными условиями.***

Особенностью сложных систем является затрудненность или невозможность получения аналитических зависимостей для построения моделей. В этом случае используется имитационное моделирование. В имитационной модели поведение компонент сложной системы описывается набором алгоритмов, реализующих ситуации в системе.

***Имитационные модели – это такие математические модели, с помощью которых результат нельзя заранее предсказать или вычислить.*** Имитация представляет собой численный метод проведения на ЭВМ эксперимента с математическими моделями.

Любая моделируемая система может быть описана в терминах небольшого набора абстрактных элементов – объектов. Подобным образом, логические правила, лежащие в основе систем, могут быть сведены к обобщенному набору простых операций. Таким образом, язык моделирования может быть составлен из абстрактных объектов и операций. Элементы и логические правила конкретных систем могут представляться в терминах абстрактных объектов и операций этого языка.

#### **ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Имитационное моделирование применяют, когда:

- ***дорого или невозможно экспериментировать*** на реальном объекте;
- ***невозможно построить аналитическую модель***: в системе существуют причинные связи, последствия, нелинейности, стохастические (случайные) переменные;
- ***необходимо симитировать поведение системы во времени.***

***Цель имитационного моделирования состоит в воспроизведении поведения исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между ее элементами или разработке модели исследуемой предметной области для проведения различных экспериментов.***

Имитационное моделирование позволяет имитировать поведение системы, во времени. Причём плюсом является то, что временем в модели можно управлять: замедлять в случае с быстропротекающими процессами и ускорять для моделирования систем с медленной изменчивостью. Можно имитировать поведение тех объектов, реальные эксперименты с которыми дороги, невозможны или опасны.

К ***имитационным*** моделям приходят тогда, когда объект моделирования настолько сложен, что адекватно описать его поведение математическими уравнениями невозможно или затруднительно. Имитационное (динамическое) моделирование рассматривает модель как совокупность правил (дифференциальных уравнений, конечных автоматов, сетей Петри и т.п.), которые определяют, в какое состояние в будущем перейдет моделируемый объект из некоторого предшествующего состояния.



*Если рассматривать современное предприятие в виде сложной кибернетической системы, у которой системообразующим фактором по Анохину является прибыль как результат деятельности, то на передний план выходит задача максимального соответствия архитектуры предприятия целям его деятельности. Такая архитектура объединяет воедино все подсистемы предприятия: производство, финансы, снабжение, сбыт, информационное обеспечение.* Она агрегирует знания о бизнес-процессах, бизнес-правилах, всех видах потоков (материальных, энергетических, финансовых, информационных, людских), организационной структуре. Соответственно, все подсистемы в рамках эффективной архитектуры должны работать на общий результат.

*Отсюда следует важнейшая черта имитационного моделирования деятельности предприятий (организаций): инструментальная поддержка анализа функционирования во всех мыслимых аспектах (технологическом, экономическом, организационном и пр.) в целях совершенствования производственных и управленческих процессов, скоординированной и контролируемой работы всех подсистем.* Увидеть не только сегодняшние «узкие места», но и предвосхитить с помощью имитационной модели их появление в будущем — вот путь к полному пониманию собственного бизнеса, когда в любой момент времени можно получить ответ на вопрос о том, что, почему и как происходит в каждой из подсистем предприятия.

Реструктуризация производства, повышение качества продукции, снижение производственных и логистических расходов, моделирование жизненного цикла новой продукции, максимальный учет требований и пожеланий клиентов — вот далеко не исчерпывающий перечень проблем, полноценное решение которых вряд ли возможно без использования имитационных моделей.

**Задачи имитационного моделирования:**

- *в производстве* — моделирование бизнес-процессов, адаптации предприятия к изменению спроса на продукцию, разработка оргтехпроектов модернизации существующих производств, процессов бюджетирования и др.;

- *на транспорте* — имитационное моделирование транспортных потоков региона, анализ динамики обслуживания пассажиров в городском транспорте, модель работы терминала морского порта, моделирование процессов управления управляемых потоков воздушного движения;

- *в энергетическом комплексе* — моделирование системы хранения и реализации нефтепродуктов, системы диспетчерского управления магистральным нефтепроводом, имитационное моделирование горных работ (моделирование конвейерной сети шахты, конвейерно-локомотивного транспорта шахты, взаимодействия экскаваторов и самосвалов на разрезе, технологии проходки комбайновым и буровзрывным методом);

- *в социальной сфере* — имитационное моделирование региональных социально-экономических систем и др.

#### **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЛОГИСТИКА**

*Логистика – это современная наука о рациональной организации производства и распределения. Логистика системного подхода находит свое выражение в объединении процессов снабжения, производства, транспорта, распределения и потребления.* Логистика провозглашает приоритет потребителя перед всеми остальными субъектами логистической системы. Техническая база логистики - это современная информатика и вычислительная техника.

*Объектом изучения логистики являются материальные и соответствующие им финансовые информационные потоки.* Эти потоки на своем пути от первичного источника сырья до конечного потребителя проходят различные производственные, транспортные, складские звенья. При традиционном подходе задачи по управлению материальными потоками в каждом звене решаются, в значительной степени, обособленно. Отдельные звенья представляют при этом так называемые закрытые системы, изолированные от систем своих партнеров технически, технологически и методологически.

В логистике нашли применение различные методы моделирования, т.е. исследования логистических систем и процессов путем построения и изучения их моделей. При этом под логистической моделью понимается любой образ, абстрактный или материальный логистического процесса или логистической системы, используемый в качестве их заместителя. Основная цель моделирования - прогноз поведения системы.

**Основным видом математического моделирования является имитационное моделирование. Этот метод широко применяется при исследовании логистических систем.** Логистические системы функционируют в условиях неопределенности окружающей среды. При управлении материальными потоками должны учитываться факторы, многие из которых носят случайный характер. В этих условиях создание аналитической модели, устанавливающей количественные соотношения между различными составляющими логистических процессов, может оказаться невозможным, либо слишком дорогим.

При имитационном моделировании закономерности, определяющие характер количественных отношений внутри логистических процессов, остаются непознанными. В этом плане логистический процесс остается для экспериментатора «черным ящиком».

**Имитационное моделирование включает в себя два основных процесса: конструирование модели реальной системы; постановка экспериментов на этой модели.**

При этом могут преследоваться следующие цели: а) понять поведение логистической системы; б) выбрать стратегию, обеспечивающую наиболее эффективное функционирование логистической системы.

## **ВИДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **НАПРАВЛЕНИЯ В ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ**

Можно выделить **две разновидности имитации:**

- метод Монте - Карло (метод статистических испытаний);
- метод имитационного моделирования (статистическое моделирование).

#### **Виды имитационного моделирования**

Для решения перечисленных выше классов задач в современном имитационном моделировании сформировались и наиболее широко применяются три основных подхода:

- **дискретно-событийное моделирование,**
- **системная динамика,**
- **агентное моделирование.**

Аппарат системной динамики обычно оперирует непрерывными во времени процессами, а дискретно-событийное и агентное моделирование чаще всего используются для дискретных во времени процессов. С другой стороны, системная динамика предполагает максимальный уровень абстракции модели, дискретно-событийное моделирование отражает абстракции низкого и среднего уровня. Агентное моделирование может применяться на любом уровне модели любого масштаба.

### **ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Дискретно-событийное моделирование обязано своим рождением Дж. Гордону, который в начале 1960-х спроектировал и реализовал на IBM систему GPSS. Основной объект в этой системе — транзакт (заявка на обслуживание), который может определенным образом представлять собой работников, детали, сырье, документы, сигналы и т. п. Перемещаясь по модели, транзакты становятся в очереди к одноканальным и многоканальным устройствам, захватывают и освобождают эти устройства, расщепляются, уничтожаются и т.д. Таким образом, дискретно - событийную модель можно рассматривать как схему обслуживания заявок. Аналитические результаты для большого количества частных случаев таких моделей рассматриваются в теории массового обслуживания.

**Дискретно – событийное моделирование** – подход к моделированию, предлагающий абстрагироваться от непрерывной природы событий и рассматривать только основные события моделируемой системы, такие как: «ожидание», «обработка заказа», «движение с грузом», «разгрузка» и другие. Дискретно-событийное моделирование наи-

более развито и имеет огромную сферу приложений – от логистики и систем массового обслуживания до транспортных и производственных систем. Этот вид моделирования наиболее подходит для моделирования производственных процессов.

#### **СИСТЕМНАЯ ДИНАМИКА**

Системная динамика как методология была предложена в 1961 году Дж. Форрестером в качестве инструмента исследования информационных обратных связей в производственно-хозяйственной деятельности, для того чтобы выяснить, каким образом взаимодействуют организационная структура, усиления (в политиках) и задержки (в принятии решений и действиях), оказывая влияние на эффективность предприятия. Процессы, происходящие в реальном мире, в системной динамике представляются в терминах накопителей (фондов) и потоков между ними. Системно-динамическая модель описывает поведение системы и ее структуру как множество взаимодействующих обратных положительных и отрицательных связей и задержек. Математически такая модель выглядит как система дифференциальных уравнений.

*Системная динамика* – парадигма моделирования, где для исследуемой системы строятся графические диаграммы причинных связей и глобальных влияний одних параметров на другие во времени, а затем созданная на основе этих диаграмм модель имитируется на компьютере. По сути, такой вид моделирования более других парадигм помогает понять суть происходящего выявления причинно-следственных связей между объектами и явлениями. С помощью системной динамики строят модели бизнес-процессов, развития города, модели производства, динамики популяции, экологии и развития эпидемии.

#### **МОДЕЛИ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ**

Аналитическое моделирование сложных систем, очевидно, имеет ограниченные возможности, что и вызвало к жизни имитационные модели. Могут быть выделены следующие основные *классы имитационных моделей*: *непрерывные; дискретные; пространственные*.

*В первом случае* предметная область описывается совокупностью динамических связей, отражающих развитие процесса во времени в форме конечно-разностных уравнений и рекуррентных соотношений. Модель воспроизводит поведение объекта за определенный период времени; в этом смысле имитационная модель является динамической. Значения всех переменных, входящих в имитационную модель, вычисляются в каждый момент модельного времени. Через определенный интервал на основе старых значений вычисляются новые значения переменных и т. д. Таким образом, имитационная модель «развивается» по определенной траектории в течение заданного отрезка модельного времени. Исходные аналитические модели — системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

*Второй тип моделей* описывает потоки случайных событий, проходящие через сложную совокупность путей и узлов, и направлен на исследование стационарных, установившихся процессов. Здесь в качестве аналитического прототипа выступает теория систем массового обслуживания.

*В третьем случае* рассматриваются процессы, проходящие в пространстве, на плоскости или в объеме. Исходные аналитические модели - системы дифференциальных уравнений в частных производных, особенно часто - такой их класс, как уравнения математической физики.

В настоящее время данная классификация во многом становится условной, поскольку современные интегрированные средства моделирования — ИСМ (например, отечественная разработка Pilgrim и её зарубежные аналоги) охватывают как непрерывные, так и дискретные, и пространственно-временные процессы.

*Системная динамика* представляет собой совокупность принципов и методов анализа динамических управляемых систем с обратной связью и их применения для решения производственных, организационных и социально-экономических задач. *Три дос-*

**тижения**, обеспеченные в основном благодаря разработкам в области вооружений, сделали возможным применение системной динамики:

- **успехи в проектировании** и анализе систем управления с обратной связью;
- **прогресс в методах компьютерного моделирования** и развитие вычислительной техники;

- **накопленный опыт в моделировании процесса принятия решений**.

**Методология системной динамики** базируется на предположении, что поведение (история развития во времени) организации главным образом определяется ее информационно-логической структурой. Она отражает не только физические и технологические аспекты производственных процессов, но политику и традиции, которые явно или неявно определяют процесс принятия решений в организации. Такая структурная схема содержит источники усиления временных задержек и информационных обратных связей, подобных тем, которые встречаются в сложных инженерных системах.

**Другой аспект системной динамики** заключается в предположении, что организация более эффективно представляется в терминах лежащих в ее основе потоков, нежели в терминах отдельных функций. Потоки людей, денег, материалов, заявок и оборудования, а также интегрированные потоки информации могут быть выявлены во всех организациях. Направленность на потоковую структуру заставляет аналитика естественным образом преодолевать внутриорганизационные границы.

Для описания сложных систем с обратными связями используются **четыре основных понятия**: переменная, связь, цикл обратной связи, система с обратными связями:

- **переменная** представляет собой количество некоторого продукта, которое изменяется во времени. Переменная может выражать, например, «объем ресурсов», или показывать результат ранее принятого решения, например «затраты». Если переменная не изменяется в зависимости от изменения других переменных системы, она называется «экзогенной», т. е. внешней для системы. Переменная, значение которой изменяется в зависимости от изменения других переменных внутри системы, называется «эндогенной»;

- **связь** отражает причинно-следственные соотношения между двумя переменными. Графически ее легко себе представить как стрелку, в начале которой лежит исходная переменная, а на конце — зависимая переменная;

- **цикл** с обратной связью можно представить как совокупность двух переменных и двух связей, такую, что начальная переменная сначала влияет на значение зависимой (прямая связь), а та, в свою очередь, влияет на значение исходной (обратная связь). Характерным для такого цикла является наличие временных задержек: сначала задержка между решением и следствием от него, а затем, задержка между следствием и тем моментом времени, когда информация о следствии повлияет на новое решение;

- **система с обратными связями** — совокупность связанных между собой циклов с обратными связями. Поведение переменной, входящей в один цикл с обратной связью, может влиять на поведение другой переменной, входящей в другой цикл. Сложные задачи управления, представляемые в виде таких систем, могут состоять из большого числа циклов. Именно такие сложные системы с большим числом циклов и составляют предмет изучения системной динамики. Поэтому для анализа таких систем применяется имитационное моделирование.

Для построения имитационных моделей динамических систем используются **переменные четырех типов — время, фонд, поток и конвертор**:

- **время** является первичной переменной для имитационной модели динамической системы: ее значение генерируется системным таймером и изменяется дискретно, т. е., начиная с некоторого начального значения, время за каждый такт увеличивается на заранее заданную величину, которая служит единицей модельного времени. Число тактов и единица времени являются параметрами «прогона» модели и определяются заранее;

- **фонд** — переменная, равная объему (количеству) некоторого «продукта», накопленного в некотором хранилище за время «жизни» модели с начального по текущий мо-



мент. Продукт может поступать в фонд и/или извлекаться из него. Поэтому значение фонда в текущий момент времени можно вычислить как сумму его значения в предыдущий момент и величины, равной разности величин входящего и исходящего потоков продукта за единицу модельного времени. Переменные этого типа могут характеризовать объемы накопленной информации, служить оценкой субъективных вероятностей наступления некоторых событий к определенному моменту времени, выражать меру влияния одних субъектов некоторого процесса на другие;

- **поток** — переменная, равная объему (количеству) продукта, который поступает или извлекается из соответствующего фонда в единицу модельного времени. Значение этой переменной может изменяться в зависимости от внешних воздействий на нее. В частности, поток можно представить как функцию от значений других потоков и фондов. Простейший пример цикла с обратной связью образует входящий поток, величина которого зависит от значения фонда, в который этот поток поступает. Фонды характеризуют статическое состояние системы, а потоки - ее динамику. Если представить себе, что в какой-то момент времени все процессы в системе остановятся, то фонды будут иметь те значения, которые были на момент остановки, а потоки будут равны нулю. С другой стороны, о величине потока можно судить только за определенный промежуток времени;

- **конверторы**. Помимо фондов и потоков, при построении имитационных моделей динамических систем используются вспомогательные переменные — конверторы. Эти переменные могут быть равны константам или значениям математических функций от других переменных (в том числе и от переменной время), т. е. позволяют преобразовывать (конвертировать) одни числовые значения в другие.

#### **АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Агентное моделирование предполагает работу с децентрализованной моделью. В такой модели нет единой точки, определяющей поведение системы в целом. Агентная модель состоит из множества индивидуальных объектов (агентов) и их окружения. Поведение системы описывается на индивидуальном уровне; глобальное поведение рассматривается как результат совокупной деятельности агентов, каждый из которых действует соответственно собственному «уставу», существует в общей среде, взаимодействует со средой и другими агентами. Для описания поведения агентов используются **карты состояний**, являющиеся стандартным инструментом UML.

Для систем, содержащих большое количество активных объектов с отчетливо выраженным индивидуальным поведением, агентное моделирование является более универсальным подходом, т. к. позволяет учесть структуру и поведение любой сложности.

Другое важное достоинство агентного моделирования — возможность разработки модели даже в отсутствие априорной информации о глобальных зависимостях. Зная индивидуальную логику поведения участников процесса, можно построить агентную модель и спрогнозировать ее глобальное поведение. Агентная модель проще в сопровождении, поскольку уточнения вносятся на локальном уровне по мере накопления данных.

Концепция агентного моделирования позволяет осуществить переход от моделей системной динамики и дискретно-событийных моделей к агентным моделям с помощью процедуры конвертации. Для системно-динамических моделей может потребоваться деагрегация накопителей на множества агентов (при условии активности и различимости этих агентов). В дискретно-событийных моделях индивидуальные объекты-транзакты также могут стать агентами при условии децентрализации логики прохождения транзактов.

**Агентное моделирование** – относительно новое направление в имитационном моделировании, которое используется для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами (как в других парадигмах моделирования), а результатом индивидуальной активности членов группы. **Цель агентных моделей** – получить представление об этих глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в систе-



ме. Агент – некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться.

#### **ДРУГИЕ ПОДХОДЫ**

Группа зарубежных исследователей, усматривая аналогии между фундаментальными процессами взаимодействия молекул (перераспределение импульсов и энергии) и взаимодействия участников рынка (перераспределение денег и товаров), применили *методы статистической физики* к исследованию колебания цен на фондовом рынке. Более того, уже давно было отмечено, что закономерности процессов обмена в экономических системах сходны с закономерностями равновесных состояний в термодинамике.

Существуют и *узкоспециализированные методологии*, предназначенные исключительно для моделирования и анализа бизнес-процессов, например, ARIS (Architecture of Integrated Information Systems). Организация в ARIS рассматривается с четырех точек зрения: организационной структуры, функциональной структуры, структуры данных, структуры процессов. Для описания бизнес-процессов предлагается около 80 типов моделей, каждая из которых отражает тот или иной аспект моделирования. Развитая репрезентативная графика делает модели в ARIS особенно удобными для представления руководству и принятия стратегических решений.

ARIS хорошо стыкуется с известными ERP-системами, в частности, позволяет описать структуру SAP R/3 в терминах управления бизнес-процессами и провести реинжиниринг (импортировав в ARIS текущие описания бизнес-процессов из R/3). Есть возможность проверки создаваемых моделей на соответствие методологии SAP и тестирования проекта на соответствие требованиям стандарта качества ISO 9000.

Как показывает практика, внедрению ARIS должна предшествовать серьезная «безмашинная» проектно-аналитическая подготовка. Обычно ARIS используется либо для формирования бизнес-структуры с самого начала, либо для ее крупномасштабной комплексной перестройки. Методики оптимизации, предлагаемые ARIS, представляют собой только первичный этап оптимизации бизнес-процессов.

Модуль ARIS Simulation может быть использован для проведения динамических экспериментов в целях определения узких мест в реализации процессов (несогласованность параллельно выполняемых процессов, нехватка ресурсов и т. п.). Для этого требуется формализовать временные характеристики исследуемых бизнес-процессов.

#### **ВЫВОДЫ**

Присутствие в экономико-математических моделях материального, финансового и социального факторов требует применения различных инструментов на соответствующем модельном уровне. Так, производственно-технологические модели (традиционно рассматриваемые как системы массового обслуживания) неплохо моделируются дискретно-событийными средствами типа GPSS; финансовые модели хорошо вписываются в рамки системной динамики; для имитационного моделирования трудовых ресурсов может быть полезен агентный подход.

В разработке программных систем произошли революционные изменения, радикально изменившие принципы работы со сложными системами. Концепции объектно-ориентированного проектирования и программирования, нашедшие свое воплощение в агентном моделировании, позволяют строить модели реальных систем (сложных, нелинейных, стохастических, с обратными связями) не только с помощью профессиональных программистов, но и самими пользователями в терминах бизнес-процессов.

### **ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

#### **ЭВОЛЮЦИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Задолго до появления концепций системной динамики имитационное моделирование проводилось на аппаратных комплексах. Первыми системами моделирования были аналоговые ЭВМ (АВМ). Они предназначались в основном для моделирования в реальном

масштабе времени линейных и нелинейных динамических систем, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями. Средства АВМ обеспечивали очень высокое быстродействие при сравнительно низкой стоимости, простое сопряжение с реальной аппаратурой, легкую перестройку от одной задачи к другой, удобное взаимодействие пользователя с машиной. Благодаря этому АВМ служили для математического моделирования ракет и ракетных комплексов, космических кораблей, самолетов, судов, энергетических установок и других объектов на всех этапах их создания. Кроме того, АВМ использовались для решения задач в медицине, биологии, химии и в других направлениях науки и техники. Эквивалентная производительность АВМ (производительность цифровых ЭВМ, требуемая для решения аналогичных задач) достигала 25—50 млн операций в секунду — фантастическая цифра для тех времен (сейчас, спустя 50 лет, рекорд производительности составляет 200-300 терафлопс —  $10^{12}$  операций с плавающей точкой в секунду).

С развитием цифровых вычислительных средств (ЭЦВМ-ЭВМ) центр внимания перемещается на цифровое моделирование. Одним из первых результатов здесь были язык и компилятор DYNAMO, разработанные исследовательской группой Массачусетского технологического института. С помощью этого языка моделирования можно эффективно решать системы линейных и нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений, содержащих до нескольких тысяч переменных, при этом от пользователя не требуется глубоких знаний программирования. С появлением графических средств доступа язык моделирования DYNAMO стал языком графического моделирования сложных динамических систем. В полном объеме его выразительные возможности реализованы в системе визуального моделирования «Ithink».

**Эволюция программных средств** моделирования может быть представлена в виде последовательной смены пяти поколений:

- **первое поколение** (50-е годы, FORTRAN, ALGOL...) — программирование моделей на языках высокого уровня без какой-либо специальной поддержки;

- **второе поколение** (60-е годы, GPSS, SIMULA, SIMS-CRIPT...) — специальная поддержка моделирования в виде соответствующих выражений языка, генераторов случайных чисел, средств представления результатов;

- **третье поколение** (70-е годы, ACSL...) — возможность комбинированного непрерывно-дискретного моделирования;

- **четвертое поколение** (80-е годы, SIMFACTORY, XCELL...) — ориентация на конкретные области приложения, возможность анимации;

- **пятое поколение** (90-е годы, SIMPLEX II, SIMPLE++...) — графический интерфейс, интегрированная среда для создания и редактирования моделей, планирования экспериментов, управления моделированием и анализа результатов.

Интегрированные системы моделирования (ИСМ) можно рассматривать в качестве программного средства **шестого поколения**, развивающего важнейшие особенности средств пятого поколения и ориентированного на использование не только массовых компьютеров, но и параллельных высокопроизводительных вычислительных систем.

В качестве **основных принципов построения ИСМ** могут быть названы следующие: **модульная структура, масштабируемость, открытая архитектура, иерархия моделей, развитый графический интерфейс.**

**Модульная структура.** Разбиение системы на относительно автономные модули с четко специфицированным интерфейсом позволяет обеспечить целый ряд преимуществ:

- **снижение порога сложности системы** и максимальное распараллеливание работ по ее разработке, развитию и сопровождению;

- **возможность развития** системы путем замены отдельных модулей;

- **вариативность функциональных возможностей**, обеспечиваемая возможностью разработки альтернативных наборов модулей;

- **высокая гибкость и адаптируемость системы** за счет комплектации наборами модулей, которые максимально соответствуют текущим требованиям;

- **расширение возможностей интеграции системы** с другими программными продуктами путем использования различных интерфейсных модулей для связи с внешними системами и независимого использования отдельных модулей в других системах.

**Масштабируемость.** Данный принцип предполагает реализацию на основе модульности различных вариантов ИСМ, отличающихся как сложностью и объемом, так и требованиями к аппаратным средствам. При этом обеспечивается:

- **возможность реализации простейших вариантов системы** для целей ознакомления и первоначального обучения с минимальными требованиями к аппаратным средствам и ориентацией на компьютерные средства, широко используемые в учебном процессе;

- **постепенное наращивание функциональных возможностей** системы по мере роста подготовленности пользователя и использования более производительных и совершенных аппаратных средств;

- **возможность эффективного использования массового параллелизма** различных высокопроизводительных вычислительных систем при решении задач повышенной сложности и ресурсоемкости.

**Открытая архитектура.** Четкая спецификация межмодульных интерфейсов позволяет обеспечить их взаимозаменяемость, а также:

- **возможность доукомплектации системы** наборами специализированных модулей, дополняющими ее функциональные характеристики в требуемом направлении;

- **возможность разработки** сторонними организациями отдельных комплектующих модулей, ориентированных на конкретные приложения;

- **развитие системы** непосредственно пользователем путем разработки и совершенствования соответствующих модулей;

- **расширение возможностей системы** за счет включения внешних программных средств, различных редакторов, средств символьной манипуляции, визуализации и т. п.

- **возможность интеграции отдельных программных модулей** системы в другие программные продукты различного назначения.

**Иерархия моделей.** Поддержка создания и редактирования иерархически специфицированных моделей обеспечивает:

- **построение на базе элементарных модельных блоков и структур синтезированных блоков и структур**, соответствующих конкретным моделируемым объектам (электродвигатель, регулятор и т. п.), которые в свою очередь также могут использоваться в качестве элементов для построения более укрупненных моделей и т. д., что позволяет успешно преодолеть модельную сложность реальных динамических объектов;

- **формирование библиотек** различного уровня модельной иерархии, ориентированных на широкий спектр приложений и различный уровень подготовки пользователей;

**Графический интерфейс** должен гарантировать:

- **наглядность создаваемых моделей**, процессов и результатов моделирования;

- **возможность выполнения большинства операций** на всех этапах от начального синтеза модели до анализа полученных результатов без использования алфавитно-цифровой клавиатуры, а с помощью только указательного устройства (манипуляторов «мышь», трекбол и т. п.), что существенно упрощает эксплуатацию системы;

- **возможность непосредственного «визуального проектирования»** моделей путем манипуляции с пиктограммами без привлечения специальных языков описания моделей, что позволяет значительно сократить время освоения системы и во многих случаях — затраты времени на подготовку, отладку и документирование моделей.

#### **ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ Pilgrim**

Рассмотрим объектно-ориентированную систему имитационного моделирования Pilgrim, имеющую возможности агрегирования экономических объектов. Система охватывает возможности всех перечисленных выше классов — системной динамики, стохастического дискретного моделирования, пространственного моделирования.

Существуют **шесть основных понятий**, на которых базируется концепция моделирующей системы:

- **граф модели**. Все процессы, независимо от количества уровней структурного анализа, объединяются в виде направленного графа. Пример изображения модели в виде многослойного иерархического графа показан на рисунке 5;

- **транзакт** — формальный запрос на обслуживание. Транзакт в отличие от обычных заявок, которые рассматриваются при анализе моделей массового обслуживания, имеет набор динамически изменяющихся свойств и параметров. Транзакт может выполнять следующие действия: порождать группы (семейства) других транзактов; поглощать другие транзакты конкретного семейства; захватывать ресурсы, использовать их, а затем — освобождать; определять времена обслуживания, накапливать информацию о пройденном пути и иметь информацию о своем дальнейшем пути и о путях других транзактов;

- **узлы графа** сети представляют собой центры обслуживания транзактов (но необязательно массового обслуживания). В узлах транзакты могут задерживаться, обслуживаться, порождать семейства новых транзактов, уничтожать другие транзакты;

- **событием** называется факт выхода из узла одного транзакта. События всегда происходят в определенные моменты времени и могут быть связаны с точкой пространства. Интервалы между двумя соседними событиями в модели — случайные величины;

- **ресурс** может характеризоваться тремя общими параметрами: мощностью, остатком и дефицитом. Мощность ресурса — максимальное число ресурсных единиц, остаток ресурса — число незанятых на данный момент единиц, дефицит ресурса — количество единиц ресурса в суммарном запросе транзактов, стоящих в очереди к данному ресурсу;

- **пространство** — географическое, декартова плоскость. Узлы, транзакты и ресурсы могут быть привязаны к точкам пространства и мигрировать в нем;

**Транзакты, узлы, события и ресурсы** — основные взаимодействующие объекты имитационной модели.

**Области применения:** бизнес-процессы, боевые действия, динамика населения, ИТ-инфраструктура, математическое моделирование процессов, логистика, производство, рынок и конкуренция, сервисные центры, цепочки поставок, уличное движение, управление проектами, экосистемы.

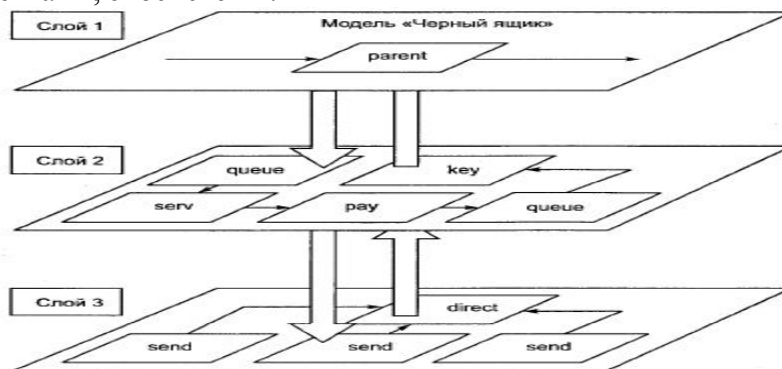


Рисунок 5 - Многослойная модель предметной области

Наряду с Pilgrim среди современных программных комплексов имитационного моделирования можно выделить следующие продукты: «Process Charter» (фирма «Scitor», США); «Powersim» (фирма «Modell Data», Норвегия); «iThink» (фирма «High Performance Systems», США); «Extend+BPR» (фирма «Imagine That!», США); «ReThink» (фирма «Gensym», США), DYNAMO, Stella, Vensim, ModelMaker и др.



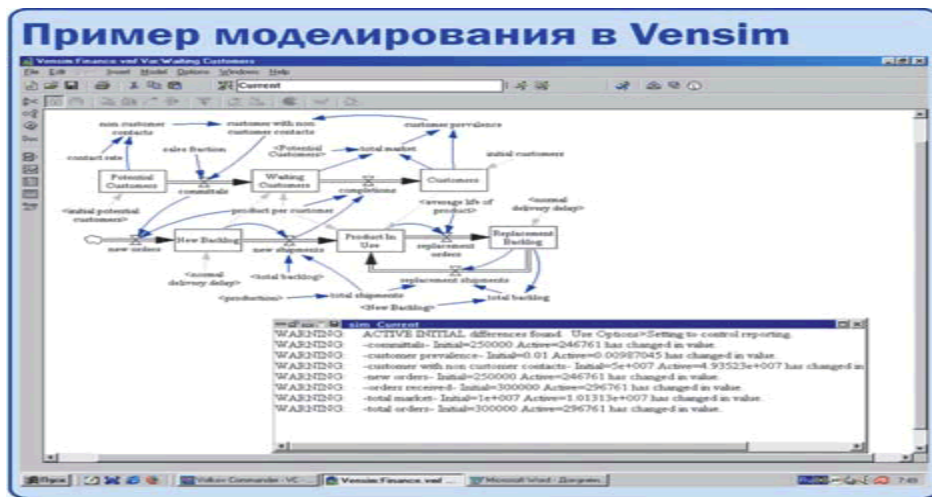


Рисунок 6 – Пример моделирования в Vensim

Пакет *Vensim* (рисунок 6) представляет собой инструмент для визуального моделирования, поддерживающий разработку концептуальной модели, документирование, собственно моделирование, анализ результатов и оптимизацию моделей динамических систем. Он позиционируется на рынке программных продуктов как простое и гибкое средство для построения имитационных моделей систем с причинно-следственными связями, фондами и потоками. Vensim существует и в версии для образовательных целей.

**Программные комплексы Stella и iThink** предназначены для преобразования моделей принятия решений в имитационные модели. Основной упор делается на формирование у пользователя умения принимать решения, необходимые для исследования систем со сложными взаимозависимыми связями между подсистемами. Динамика процессов и объектов выражается с помощью пяти типов базовых параметров: увеличение фондов, исчерпание фондов, рабочий процесс, соединение потоков, адаптация фондов. Соответственно, модели представляются тремя иерархическими уровнями: блок-схемы, базовые потоковые схемы, формальные спецификации.

**Одна из наиболее показательных сфер применения аппарата системной динамики — имитационное моделирование финансово-кредитной деятельности.** Существует ряд моделей банковских и страховых учреждений, выполненных с помощью PowerSim и iThink, обеспечивающих расчет показателей текущего и будущих периодов, прогнозы состояния отдельных сделок и состояния финансового учреждения в целом, оценку привлекательности направлений инвестиционной деятельности, оценку эффективности кредитного и депозитного портфелей банка.

#### СИСТЕМА GPSS

**GPSS (General Purpose Simulation System)** - язык программирования, используемый в основном для имитационного моделирования систем массового обслуживания.

Система GPSS была разработана в 1961 году. Программа на языке GPSS состоит из блоков, которые имитируют различные параметры «устройств» в модели: ожидание, выполнение работы и другие. Блок начинает выполняться при попадании в него транзактов — активных элементов модели. К транзактам применяются различные правила, описанные в блоках программы.

**Пример** кода для системы GPSS:

```
SIMULATE
GENERATE 10,3 ; генерация потока транзактов с параметрами равномерного распределения
.....
ADVANCE 15,5 ; задержка транзакта в течение времени, распределённому по равномерному закону
.....
TERMINATE ; удаление транзакта
```



### СИСТЕМА AnyLogic

*AnyLogic* — программное обеспечение для имитационного моделирования сложных систем и процессов, разработанное российской компанией «Экс Джей Текнолоджис». Программа обладает графической средой пользователя и позволяет использовать язык Java для разработки моделей.

Последняя версия программы, *AnyLogic 6*, была выпущена в 2007 году. Для её создания применена среда разработки Eclipse. *AnyLogic 6* является кроссплатформенным программным обеспечением и имеет версии для ОС Microsoft Windows, Mac OS, Linux.

*AnyLogic 5* — предыдущая версия программы, которая была выпущена в 2003 году, написана на C++ и Java и работает только под ОС Windows.

*AnyLogic* — многоподходный инструмент имитационного моделирования, позволяющий создавать модели *с применением следующих методов*: системная динамика; дискретно-событийное (процессное) моделирование; агентное моделирование.

*AnyLogic* находит применение в следующих областях: производство; логистика и цепочки поставок; рынок и конкуренция; бизнес-процессы и сферы обслуживания; здравоохранение и фармацевтика; управление активами и проектами; телекоммуникации и информационные сети; социальные и экологические системы; оборона.

### СИСТЕМА eM-Plant

*eM-Plant* — программная среда имитационного моделирования систем и процессов. Продукт создан в 1992 году компанией AESOP, Германия. Позднее продукт *eM-Plant* был переименован и стал называться Tecnomatix Plant Simulation Tool.

*eM-Plant* представляет собой визуальную объектно-ориентированную среду для построения имитационных моделей широкого класса систем. Модели строятся из имеющейся библиотеки стандартных объектов, состоящей из нескольких основных разделов: Material Flow — объекты, предназначенные для обработки подвижных объектов (Source (источник деталей), Buffer (накопитель), Line (конвейер)); Movable Units — подвижные объекты: Entity (деталь), Container (тара), Transporter; Information Flow — объекты для информационного обеспечения модели (переменные, таблицы, генераторы событий, интерфейсы, методы для обработки событий); User Interface — объекты для представления данных (графики, диаграммы)

Все объекты обладают набором параметров (например, время операции) и поведением. Можно строить более сложные структуры, объединяя базовые объекты и добавляя подпрограммы (методы) обработки событий на языке SimTalk. Таким образом, можно создавать пользовательские библиотеки объектов и иерархические модели.

При моделировании подвижные объекты (Movable Units) перемещаются по созданной структуре, генерируя события в моменты времени, определяемые параметрами объектов. По результатам моделирования собирается статистика - производительность за промежуток времени, время использования оборудования, заполненность накопителей, другие показатели. Для оценки работы системы могут использоваться аналитические инструменты: анализатор узких мест, диаграмма Ганта, диаграмма Сэнки и др.

### СЕТИ ПЕТРИ

*Сети Петри* — математический аппарат для моделирования динамических дискретных систем. Впервые описаны Карлом Петри в 1962 году.

Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный граф, состоящий из вершин двух типов — позиций и переходов, соединённых между собой дугами, вершины одного типа не могут быть соединены непосредственно. В позициях могут размещаться метки (маркеры), способные перемещаться по сети.

Событием называют срабатывание перехода, при котором метки из входных позиций этого перехода перемещаются в выходные позиции. События происходят мгновенно, одновременно при выполнении некоторых условий.

*Виды сетей Петри: временная сеть Петри* — переходы обладают весом, определяющим продолжительность срабатывания (задержку); *стохастическая сеть Петри*

— задержки являются случайными величинами; *функциональная сеть Петри* — задержки определяются как функции некоторых аргументов, например, количества меток в каких-либо позициях; *цветная сеть Петри* — метки могут быть различных типов, обозначаемых цветами, тип метки может быть использован как аргумент в функциональных сетях; *иерархическая сеть* — содержит не мгновенные переходы, в которые вложены другие, возможно, также иерархические, сети. Срабатывание такого перехода характеризует выполнение полного жизненного цикла вложенной сети.

Для имитационного моделирования разработаны системы CPN (Color Petri Nets), INCOME Mobile, CPN-AMI.

#### **СИСТЕМА Arena**

Разработанное компанией Systems Modeling Corporation программное обеспечение для имитационного моделирования позволяет создавать подвижные компьютерные модели многих реальных систем. Arena снабжена удобным объектно-ориентированным интерфейсом и обладает возможностями по адаптации к всевозможным предметным областям.

Последняя версия системы - Arena 3.0. В ней удачно соединены интерфейсные возможности среды Windows и присущая Arena легкость иерархического построения модели и ее последовательного приближения к реальному объекту.

Основа технологий Arena - язык моделирования SIMAN и система Cinema Animation. SIMAN, впервые реализованный в 1982г. - чрезвычайно гибкий и выразительный язык моделирования. Для отображения результатов моделирования используется анимационная система Cinema animation, известная на рынке с 1984 г. Процесс моделирования организован следующим образом. Сначала пользователь шаг за шагом строит в визуальном редакторе системы Arena модель. Затем система генерирует по ней соответствующий код на SIMAN, после чего автоматически запускается Cinema animation.

Интерфейс Arena включает в себя всевозможные средства для работы с данными, в том числе электронные таблицы, базы данных, ODBC, OLE, поддержку формата DXF.

SIMAN позволяет рассматривать процессы в различных масштабах времени. SIMAN позволяет выделить переменные, важные для функционирования моделируемой системы, и проанализировать имеющиеся между ними связи. SIMAN позволяет выявлять «узкие места» в материальных, информационных и других потоках. Моделирование дает возможность изучать объекты, о поведении которых имеется недостаточно информации.

В поставку Arena входят готовые шаблоны решений (Application Solution Templates). Каждый такой шаблон представляет собой набор специализированных модулей, превращающих Arena в проблемно-ориентированную среду моделирования. Arena Professional Edition дает пользователям возможность создавать собственные шаблоны решений, а также заказные модули. Дополненная шаблонами и заказными модулями Arena может использоваться специалистами в той или иной предметной области, поскольку представляет собой, по сути дела, проекцию системы на эту предметную область.

В Arena все функции, необходимые для эффективного проведения моделирования, собраны в удобную интегрированную среду. Input Analyzer позволяет адаптировать ранее определенные структуры данных к реальным входным данным. Output Analyzer, средство полного качественного анализа, дает возможность отображать и сравнивать данные, собранные в процессе имитации. С помощью Scenario Manager можно запустить целую серию имитаций, а потом проанализировать их результаты.

## **СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

### **СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Теория систем массового обслуживания (СМО) восходит к работам А. К. Эрланга по исследованию причин неэффективности телефонных сетей. Примерами СМО могут служить: телефонные станции, ремонтные мастерские, билетные кассы, справочные бюро,

магазины, парикмахерские и т.п. Каждая СМО состоит из какого-то числа обслуживающих единиц, которые называют каналами обслуживания. В качестве каналов могут фигурировать: линии связи, приборы, железнодорожные пути, лифты, автомашины и другие.

Каждая СМО предназначена для обслуживания какого-то потока заявок или «требований», поступающих на СМО в какие-то случайные моменты времени. Обслуживание поступившей заявки продолжается некоторое (случайное) время, после чего канал освобождается и готов к принятию следующей заявки. Случайный характер потока заявок приводит к тому, что на входе СМО образуется очередь.

Система массового обслуживания в зависимости от числа каналов и их производительности, а также от характера потока заявок обладает пропускной способностью, позволяющей ей более или менее успешно справляться с потоком заявок.

**Предмет теории массового обслуживания** - установление зависимости между характером потока заявок, числом каналов, их производительностью, правилами работы СМО и успешностью (эффективностью) обслуживания.

В качестве характеристик эффективности обслуживания, в зависимости от условий задачи и целей исследования, могут применяться различные величины и функции:

- среднее количество заявок, которое может обслужить СМО в единицу времени;
- средний процент заявок, получающих отказ и покидающих СМО;
- вероятность немедленного обслуживания заявки;
- среднее время ожидания в очереди;
- закон распределения времени ожидания;
- среднее количество заявок, находящихся в очереди;
- средний доход, приносимый СМО в единицу времени, и т. д.

Случайный характер, как потока заявок, так и длительности обслуживания приводит к тому, что в СМО будет происходить какой-то случайный процесс. Необходимо изучить случайный процесс, протекающий в системе, описать его математически. Этим и занимается теория массового обслуживания.

Область применения математических методов теории массового обслуживания непрерывно расширяется. Как системы массового обслуживания могут рассматриваться: информационно-вычислительные сети, операционные системы; системы сбора и обработки информации; автоматизированные производственные цехи, поточные линии; транспортные системы и т. п.

Одной из таких областей является логистика. Она непосредственно связана с системами массового обслуживания. Приводится несколько примеров, когда мы сталкиваемся с логистикой в системах массового обслуживания.

**Пример.** Клиенты приходят в банк и выстраиваются в одну очередь, которая обслуживается несколькими окнами. Интенсивность входящего потока укажет на оптимальное количество окон, которые должны быть открыты для обслуживания.

**Пример.** Клиентские заказы поступают на базу предприятия и затем распределяются по соответствующим отделам. Главное, чтобы эти заказы обрабатывались быстро и эффективно, а количество занятых этим работников и последовательность выполнения ими своих действий можно отнести к вопросам массового обслуживания.

**Пример.** Готовые изделия на выходе линии сборки должны быть отправлены на центральный склад. Места для готовой продукции там немного, и поэтому главное — быстро эти товары отработать и отправить. Товары, по сути, образуют очередь на выходе со сборочной линии, и за этим необходим внимательный контроль.

**Математическое исследование СМО облегчается, если случайный процесс, протекающий в системе, является марковским. Тогда удастся сравнительно просто описать работу СМО с помощью аппарата обыкновенных дифференциальных или линейных алгебраических уравнений и выразить основные характеристики СМО.**

## МАРКОВСКИЕ СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ

*Многие изменяющиеся во времени сложные системы целесообразно рассматривать как случайные процессы, ход которых зависят от ряда случайных факторов, сопровождающих это развитие. Для того чтобы вычислить числовые параметры, характеризующие такие системы, нужно построить некоторую вероятностную модель явления, учитывающую сопровождающие его случайные факторы.*

Пусть имеется некоторая система  $S$ , состояние которой меняется с течением времени (под системой  $S$  может пониматься: техническое устройство, производственный процесс, вычислительная машина, информационная сеть и т. д.). Если состояние системы  $S$  меняется во времени случайным образом, то в системе протекает случайный процесс.

**Случайный процесс, протекающий в системе  $S$ , называется марковским** (или «процессом без последействия»), если он обладает следующим свойством: для каждого момента времени  $t_0$  вероятность любого состояния системы в будущем ( $t > t_0$ ) зависит только от ее состояния в настоящем (при  $t = t_0$ ) и не зависит от того, когда и каким образом система пришла в это состояние.

Случайный процесс называется процессом с дискретными состояниями, если возможные состояния системы  $S_1, S_2, S_3, \dots$  можно перечислить (перенумеровать) одно за другим, а сам процесс состоит в том, что время от времени система  $S$  скачком (мгновенно) переходит из одного состояния в другое.

Кроме процессов с дискретными состояниями существуют случайные процессы с непрерывными состояниями: для этих процессов характерен постепенный, плавный переход из состояния в состояние. Например, процесс изменения напряжения в осветительной сети представляет собой случайный процесс с непрерывными состояниями.

При анализе случайных процессов с дискретными состояниями пользуются так называемым графом состояний и переходов (ГСП) (рисунок 7). ГСП графически изображает возможные состояния системы и ее возможные переходы из состояния в состояние.

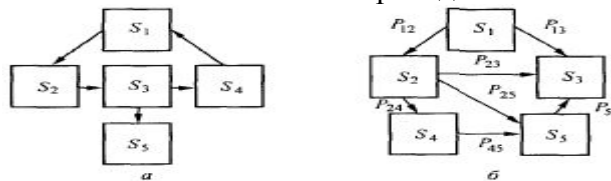


Рисунок 7 - Граф состояний и переходов: а — обычный; б — размеченный

Пусть имеется система  $S$  с  $n$  дискретными состояниями:  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ . Каждое состояние изображается прямоугольником, а возможные переходы из состояния в состояние - стрелками, соединяющими эти прямоугольники.

Пусть система  $S$  - прибор, который может находиться в одном из пяти возможных состояний:  $S_1$  - исправен, работает;  $S_2$  - неисправен, ожидает осмотра;  $S_3$  - осматривается;  $S_4$  - ремонтируется;  $S_5$  - списан. ГСП системы изображен на рисунке 7, а.

## МАРКОВСКИЕ ЦЕПИ

Способы описания марковского случайного процесса, протекающего в системе с дискретными состояниями, зависят от того, в какие моменты времени — заранее известные или случайные — могут происходить переходы системы из состояния в состояние.

**Случайный процесс называется процессом с дискретным временем**, если переходы системы из состояния в состояние возможны только в строго определенные, заранее фиксированные моменты времени. В промежутки времени между этими моментами система  $S$  сохраняет свое состояние.

**Случайный процесс называется процессом с непрерывным временем**, если переход системы из состояния в состояние возможен в любой, случайный момент  $t$ .

Рассмотрим марковский случайный процесс с дискретными состояниями и дискретным временем. Пусть имеется система  $S$ , которая может находиться в состояниях:  $S_1, S_2, \dots, S_n$  причем изменения состояния системы возможны только в моменты:  $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$

Будем называть эти моменты «шагами» или «этапами» процесса и рассматривать случайный процесс как функцию целочисленного аргумента: 1, 2, ..., k, ... (номера шага).

Случайный процесс, происходящий в системе, состоит в том, что в последовательные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$  система S оказывается в тех или иных состояниях.

Условимся обозначать  $S_i^{(k)}$  событие, состоящее в том, что после k шагов система находится в состоянии  $S_i$ . При любом k события  $S_1^{(k)}, S_2^{(k)}, \dots, S_i^{(k)}, \dots, S_n^{(k)}$  образуют полную группу и несовместны.

Процесс, происходящий в системе, можно представить как последовательность (цепочку) событий, например:  $S_1^{(0)}, S_2^{(1)}, S_1^{(2)}, S_4^{(3)}, \dots$

Такая случайная последовательность событий называется марковской цепью, если для каждого шага вероятность перехода из любого состояния  $S_i$  в любое  $S_j$  не зависит от того, когда и как система пришла в это состояние.

Марковскую цепь можно описать с помощью вероятностей состояний. Пусть в любой момент времени (после любого k-го шага) система S может быть в одном из состояний:  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ , т. е. осуществится одно из полной группы несовместных событий:  $S_1^{(k)}, S_2^{(k)}, \dots, S_i^{(k)}, \dots, S_n^{(k)}$ . Обозначим вероятности этих событий для k-го шага:  $p_1(k)=p(S_1^{(k)}), p_2(k)=p(S_2^{(k)}), \dots, p_i(k)=p(S_i^{(k)}), \dots, p_n(k)=p(S_n^{(k)})$ . Для каждого номера шага k  $p_1(k)+p_2(k)+\dots+p_n(k)=1$ , как вероятность полной группы несовместных событий. Вероятности  $p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k)$  называются вероятностями состояния. В совокупности они образуют вектор:  $P^{(k)} = (p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k))$ .

Случайный процесс (марковскую цепь) можно представить себе так, как будто точка, изображающая систему S, случайным образом перемещается (блуждает) по графу состояний, перескакивая из состояния в состояние в моменты  $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$ , а иногда (в общем случае) задерживаясь на какое-то число шагов в одном и том же состоянии.

Для любого шага (момента времени  $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$  или номера 1, 2, ..., k, ... существуют некоторые вероятности перехода системы из любого состояния в любое другое (некоторые из них равны нулю), а также вероятность задержки системы в данном состоянии. Будем называть эти вероятности переходными вероятностями марковской цепи.

Марковская цепь называется однородной, если переходные вероятности не зависят от номера шага. В противном случае марковская цепь является неоднородной.

Рассмотрим однородную марковскую цепь. Обозначим через  $P_y$  вероятность перехода за один шаг из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$ . Вероятность  $P_y$  - задержка системы в состоянии  $S_i$ . Запишем данные вероятности в форме квадратной матрицы:

$$P = P_y = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nj} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Некоторые из переходных вероятностей  $P_y$  могут быть равны нулю, что означает невозможность перехода системы из i - состояния в j за один шаг. По главной диагонали матрицы переходных вероятностей стоят вероятности  $P_{ii}$  того, что система не выйдет из состояния  $S_i$ , а останется в нем. Сумма членов, стоящих в каждой строке матрицы, должна быть равна единице, так как события несовместны и образуют полную группу.

При рассмотрении марковских цепей часто бывает удобно пользоваться ГСП, на котором у стрелок проставлены соответствующие переходные вероятности. На рисунке 7, б проставлены не все переходные вероятности, а только те из них, которые не равны нулю и меняют состояние системы при  $i \neq j$ . Вероятности задержки  $P_{11}, P_{22}$  и другие проставлять на графе излишне, так как каждая из них дополняет до единицы сумму переходных вероятностей, соответствующих всем стрелкам, исходящим из данного состояния. Например, для графа - рисунок 4,б:  $P_{11}=1-(P_{12}+P_{13})$ ;  $P_{22}=1-(P_{23}+P_{24}+P_{25})$ ;  $P_{33}=1$ ;  $P_{44}=1-P_{45}$ ;  $P_{55}=1-P_{53}$ .

Если из состояния  $S_i$  не исходит ни одной стрелки (переход из него ни в какое другое состояние невозможен), соответствующая вероятность задержки  $P_{ii}$  равна единице.



Имея в распоряжении размеченный ГСП и зная начальное состояние системы, можно найти вероятности состояний после любого  $k$ -го шага.

Предположим, что в начальный момент (перед первым шагом) система находится в каком-то определенном состоянии, например  $S_m$ . Тогда для начального момента (0) будем иметь:  $p_1(0)=0, p_2(0)=0, \dots, p_m(0)=1, \dots, p_n(0)=0$ , т. е. вероятности всех состояний равны нулю, кроме вероятности начального состояния  $S_m$ , равной единице.

Вероятности состояний после первого шага. Перед первым шагом система находится в состоянии  $S_m$ . За первый шаг она перейдет в состояния  $S_1, S_2, \dots, S_m, \dots, S_n$  с вероятностями  $P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mm}, \dots, P_{mn}$ , находящимися в  $m$ -й строке матрицы переходных вероятностей. Таким образом, вероятности состояний после первого шага будут:

$$p_1(1)=P_{m1}, p_2(1)=P_{m2}, \dots, p_m(1)=P_{mm}, \dots, p_n(1)=P_{mn}. \quad (2)$$

Вероятности состояний после второго шага:  $P^{(2)}=(p_1(2), p_2(2), \dots, p_i(2), \dots, p_n(2))$ .

Вычислим их по формуле полной вероятности с гипотезами: после первого шага система была в состоянии  $S_1$ ; или  $S_2$ ; или  $S_i$ ; или  $S_n$ . Вероятности гипотез известны (2); условные вероятности перехода в состояние  $S_i$  при каждой гипотезе тоже известны. По формуле полной вероятности получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1(2) = p_1(1)P_{11} + p_2(1)P_{21} + \dots + p_n(1)P_{n1}; \\ p_2(2) = p_1(1)P_{12} + p_2(1)P_{22} + \dots + p_n(1)P_{n2}; \\ \dots \\ p_i(2) = p_1(1)P_{i1} + p_2(1)P_{i2} + \dots + p_n(1)P_{ni}; \\ \dots \\ p_n(2) = p_1(1)P_{1n} + p_2(1)P_{2n} + \dots + p_n(1)P_{nn} \quad \text{или} \\ p_i(2) = \sum p_j(1)P_{ji}, \quad (i=1, \dots, n). \end{array} \right. \quad (3)$$

В формулах (3-4) суммирование распространяется формально на все состояния  $S_1, S_2, \dots, S_m, \dots, S_n$ , фактически учитывать надо только те из них, для которых переходные вероятности  $P_{ji}$  отличны от нуля, т. е. те состояния, из которых может совершиться переход в состояние  $S_i$  (или задержка в нем).

Вероятности состояний после третьего шага определяются аналогично:

$$p_i(3) = \sum p_j(2)P_{ji}, \text{ и вообще после } k\text{-го шага: } p_i(k) = \sum p_j(k-1)P_{ji}. \quad (5)$$

Итак, вероятности состояний  $p_i(k)$  после  $k$ -го шага определяются рекуррентной формулой (5) через вероятности состояний после  $(k-1)$ -го шага; те, в свою очередь, — через вероятности состояний после  $(k-2)$ -го шага и т. д.

**Пример.** По некоторой цели ведется стрельба четырьмя выстрелами в моменты времени  $t_1, t_2, t_3, t_4$ . Возможные состояния цели:  $S_1$  - цель невредима;  $S_2$  - цель незначительно повреждена;  $S_3$  - цель получила существенные повреждения;  $S_4$  - цель полностью поражена (не может функционировать). Размеченный ГСП системы показан на рисунке 8, а. В начальный момент цель находится в состоянии  $S_1$  (не повреждена). Определить вероятности состояний цели после четырех выстрелов.

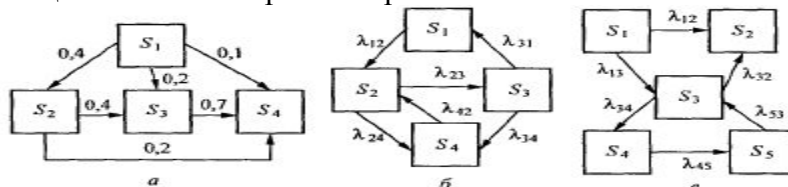


Рисунок 8 - Пример графа состояний и переходов (а), размеченные графы (б, в)

Из графа состояний имеем:  $P_{12} = 0,4; P_{13}=0,2; P_{14}=0,1$  и  $P_{11} = 1 - (P_{12}+P_{13}+P_{14}) = 0,3$ .

Аналогично находим:  $P_{21} = 0; P_{22}=0,4; P_{23}=0,4; P_{24}=0,2; P_{31} = 0; P_{32}=0; P_{33}=0,3; P_{34}=0,7;$

$P_{41} = 0; P_{42}=0; P_{43}=0; P_{44}=1$ . Таким образом, матрица переходных вероятностей имеет вид:

$$P = \begin{vmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{vmatrix}$$

Так как в начальный момент цель  $S$  находится в состоянии  $S_1$ , то  $p_1(0) = 1$ . Вероятности состояний после первого шага (выстрела) берутся из первой строки матрицы:  $p_1(1) = 0.3$ ,  $p_2(1) = 0.4$ ,  $p_3(1) = 0.2$ ,  $p_4(1) = 0.1$ .

Вероятности состояний после второго шага:  $p_1(2) = p_1(1)P_{11} = 0.3 \cdot 0.3 = 0.09$ ,  $p_2(2) = p_1(1)P_{12} + p_2(1)P_{22} = 0.3 \cdot 0.4 + 0.4 \cdot 0.4 = 0.28$ ,  $p_3(2) = p_1(1)P_{13} + p_3(1)P_{33} + p_2(1)P_{23} = 0.3 \cdot 0.2 + 0.4 \cdot 0.4 + 0.2 \cdot 0.3 = 0.28$ ,  $p_4(2) = p_1(1)P_{14} + p_3(1)P_{34} + p_2(1)P_{24} + p_4(1)P_{44} = 0.3 \cdot 0.1 + 0.4 \cdot 0.2 + 0.2 \cdot 0.7 + 0.1 \cdot 1 = 0.35$ .

Вероятности состояний после третьего шага:  $p_1(3) = p_1(2)P_{11} = 0.09 - 0.3 = 0.027$ ;

$p_2(3) = p_1(2)P_{12} + p_2(2)P_{22} = 0.09 - 0.4 + 0.28 - 0.4 = 0.148$ ;

$p_3(3) = p_1(2)P_{13} + p_2(2)P_{23} + p_3(2)P_{33} = 0.09 \cdot 0.2 + 0.28 \cdot 0.4 + 0.28 \cdot 0.3 = 0.214$ ;

$p_4(3) = p_1(2)P_{14} + p_2(2)P_{24} + p_3(2)P_{34} + p_4(2)P_{44} = 0.09 \cdot 0.1 + 0.28 \cdot 0.2 + 0.28 \cdot 0.7 + 0.35 \cdot 1 = 0.611$ .

Вероятности состояний после четвертого шага:  $p_1(4) = p_1(3)P_{11} = 0.0081$ ;

$p_2(4) = p_1(3)P_{12} + p_2(3)P_{22} = 0.027 \cdot 0.4 + 0.148 \cdot 0.4 = 0.07$ ;  $p_3(4) = p_1(3)P_{13} + p_2(3)P_{23} + p_3(3)P_{33} = 0.027 \cdot 0.2 + 0.148 \cdot 0.4 + 0.214 \cdot 0.3 = 0.1288$ ;

$p_4(4) = p_1(3)P_{14} + p_2(3)P_{24} + p_3(3)P_{34} + p_4(3)P_{44} = 0.027 \cdot 0.1 + 0.148 \cdot 0.2 + 0.214 \cdot 0.7 + 0.611 \cdot 1 = 0.7931$ .

Таким образом, получены вероятности всех исходов обстрела цели:

- цель не повреждена:  $p_1(4) = 0.008$ ;

- цель получила незначительные повреждения:  $p_2(4) = 0.070$ ;

- цель получила существенные повреждения:  $p_3(4) = 0.129$ ;

- цель поражена полностью:  $p_4(4) = 0.793$ .

Кроме однородных марковских цепей, в которых вероятности перехода от шага  $k$  шагу не меняются, известны динамические или неоднородные цепи, в которых вероятности перехода меняются от шага  $k$  шагу (зависят от номера шага  $k$ ).

В этом случае выражение (5) приобретает вид:  $p_i(k) = \sum_j p_j(k-1)P_{ji}^{(k)}$ . (6)

#### УРАВНЕНИЯ КОЛМОГОВОРА

Эти вероятности удовлетворяют определенного вида дифференциальным уравнениям, называемым уравнениями Колмогорова. Решая эти уравнения, можно вычислить вероятности. Продемонстрируем вывод уравнений Колмогорова на конкретном примере.

Пусть система  $S$  имеет четыре возможных состояния:  $S_1, S_2, S_3, S_4$ . Размеченный ГСП системы показан на рис. 8, б.

Найдем одну из вероятностей состояний, например  $p_i(t)$ . Это вероятность того, что в момент  $t$  система будет находиться в состоянии  $S_i$ . Придав  $t$  малое приращение  $\Delta t$ , найдем вероятность того, что в момент  $t + \Delta t$  система будет находиться в состоянии  $S_i$ .

Существуют два варианта этого события:

1 В момент  $t$  система уже была в состоянии  $S_1$  и за  $\Delta t$  не вышла из этого состояния.

2 В момент  $t$  система была в состоянии  $S_1$ , а за  $\Delta t$  перешла из него в  $S_1$ .

Вероятность первого варианта равна произведению вероятности  $p_1(t)$  того, что в момент  $t$  система была в состоянии  $S_1$  на условную вероятность того, что, будучи в состоянии  $S_1$  система за время  $\Delta t$  не перейдет в  $S_2$ . Эта условная вероятность (с точностью до бесконечно малых высших порядков) равна  $1 - \lambda_{12}\Delta t$ .

Аналогично, вероятность второго варианта равна вероятности того, что в момент  $t$  система была в состоянии  $S_3$ , умноженной на условную вероятность перехода за время  $\Delta t$  в состояние  $S_1$ . Используя правило сложения вероятностей, получаем:

$$p_1(t + \Delta t) = p_1(t)(1 - \lambda_{12}\Delta t) + p_3(t)\lambda_{31}\Delta t.$$

Раскроем скобки в правой части, перенесем  $p_1(t)$  в левую часть и, разделив обе части равенства на  $\Delta t$ , получим:  $(p_1(t + \Delta t) - p_1(t)) / \Delta t = -\lambda_{12}p_1(t) + \lambda_{31}p_3(t)$ .

Если теперь устремить  $\Delta t$  к нулю и перейти к пределу:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} (p_1(t + \Delta t) - p_1(t)) / \Delta t = dp_1(t) / dt = -\lambda_{12}p_1(t) + \lambda_{31}p_3(t),$$

то имеем дифференциальное уравнение, которому должна удовлетворять функция  $p_1(t)$ .

Аналогичные дифференциальные уравнения могут быть выведены и для остальных вероятностей состояния  $p_2(t), p_3(t), p_4(t)$ :

$$\begin{cases} dp_1(t)/dt = -\lambda_{12}p_1(t) + \lambda_{31}p_3(t), \\ dp_2(t)/dt = -\lambda_{23}p_2(t) - \lambda_{24}p_2(t) + \lambda_{12}p_1(t) + \lambda_{42}p_4(t), \\ dp_3(t)/dt = -\lambda_{31}p_3(t) - \lambda_{34}p_3(t) + \lambda_{23}p_2(t), \\ dp_4(t)/dt = -\lambda_{42}p_4(t) - \lambda_{24}p_4(t) + \lambda_{34}p_3(t). \end{cases} \quad (7)$$

Эти уравнения для вероятностей состояний называются уравнениями Колмогорова. Интегрирование этой системы уравнений дает искомые вероятности состояний как функции времени. Начальные условия берутся в зависимости от того, каково было начальное состояние системы  $S$ . Например, если в начальный момент времени (при  $t = 0$ ) система  $S$  находилась в состоянии  $S_1$ , то надо принять начальные условия:  $p(0) = (1, 0, 0, 0)$ .

### ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВЕРОЯТНОСТИ СОСТОЯНИЙ

Пусть в некоторой системе с  $n$  дискретными состояниями все потоки событий, переводящих систему из одного состояния в другое, - пуассоновские. Записав систему уравнений Колмогорова для вероятностей состояний и проинтегрировав эти уравнения при заданных начальных условиях, получим вероятности состояний, как функции времени.

Что же будет происходить с системой  $S$  при  $t \rightarrow \infty$ . Будут ли функции  $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$  стремиться к каким-то пределам? Эти пределы, если они существуют, называются предельными (или «финальными») вероятностями состояний.

Можно доказать следующее общее положение. Если число состояний системы  $S$  конечно и из каждого состояния можно перейти в каждое другое, то предельные вероятности состояний существуют и не зависят от начального состояния системы.

На рисунке 4 показаны ГСП, удовлетворяющие поставленному условию: из любого состояния система может перейти в любое другое. Если на графе рисунок 9, а изменить направление стрелки 4 - 3 на противоположное, то условие не будет выполнено.

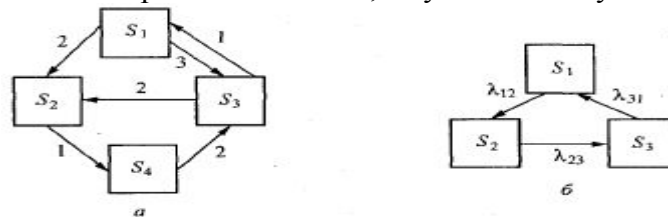


Рисунок 9 - Примеры ГСП для систем с предельными вероятностями

Предположим, что поставленное условие выполнено, и предельные вероятности существуют:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_i(t) = p_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Предельные вероятности обозначаются  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , что и сами вероятности состояний, подразумевая под ними не переменные величины (функции времени), а числа. Предельные вероятности состояний в сумме должны давать единицу:  $\sum p_i = 1$ . (9)

Таким образом, при  $t \rightarrow \infty$  в системе  $S$  устанавливается некоторый предельный стационарный режим: пусть система случайным образом и меняет свои состояния, но вероятность каждого из них не зависит от времени.

Например, если у системы три возможных состояния:  $S_1, S_2$  и  $S_3$ , и их предельные вероятности равны 0,2, 0,3 и 0,5, это означает, что после перехода к установившемуся режиму система в среднем две десятых времени будет находиться в состоянии  $S_1$ , три десятых - в состоянии  $S_2$  и половину времени - в состоянии  $S_3$ .

Для того чтобы вычислить предельные вероятности состояний, достаточно в системе уравнений Колмогорова, описывающих вероятности состояний, приравнять все левые части (производные) к нулю. В этом случае система дифференциальных уравнений превращается в систему линейных алгебраических уравнений. Совместно с условием (9) эти уравнения дают возможность вычислить все предельные вероятности (8).

### ПРОЦЕССЫ РАЗМНОЖЕНИЯ И ГИБЕЛИ

Рассмотрим важную разновидность непрерывных марковских цепей - процесс размножения и гибели. Происхождение термина берет начало от биологических задач, где подобной схемой описывается процесс изменения численности популяции.

Марковская непрерывная цепь называется «процессом размножения и гибели», если ее ГСП имеет вид, представленный на рисунке 10 а, т. е. все состояния можно вытянуть в одну цепочку, в которой каждое из средних состояний ( $S_2, \dots, S_{n-1}$ ) связано прямой и обратной связью с каждым из соседних состояний.

**Пример.** Техническое устройство состоит из трех одинаковых узлов; каждый из них может выходить из строя (отказывать); отказавший узел немедленно начинает восстанавливаться. Состояния системы:  $S_1$ - все три узла исправны;  $S_2$  - один узел отказал (восстанавливается), два исправны;  $S_3$ - два узла восстанавливаются, один исправен;  $S_4$  - все три узла восстанавливаются.

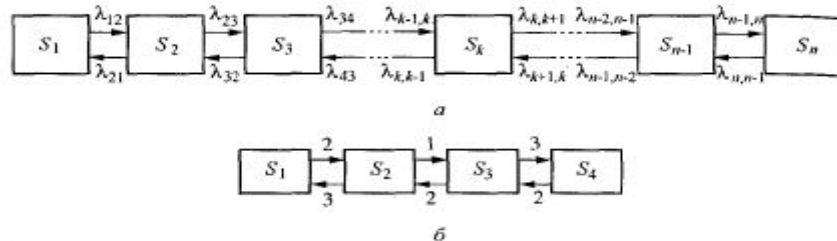


Рисунок 10-ГСП для процессов размножения и гибели: а-общий вид; б-численный пример

ГСП приведен на рисунке 10 б. Из графа видно, что процесс, протекающий в системе, представляет собой процесс размножения и гибели.

Схема размножения и гибели очень часто встречается в самых разнообразных практических задачах; поэтому имеет смысл заранее рассмотреть эту схему в общем виде и решить соответствующую систему алгебраических уравнений с тем, чтобы в дальнейшем, встречаясь с конкретными процессами, протекающими по такой схеме, пользоваться уже готовым решением.

Итак, рассмотрим случайный процесс размножения и гибели с графом состояний, представленным на рисунке 10 а.

Напишем алгебраические уравнения для вероятностей состояний. Для первого состояния  $S_1$  имеем:  $\lambda_{12}p_1 = \lambda_{21}p_2$ . Для второго состояния  $S_2$  суммы членов, соответствующих входящим и выходящим стрелкам, равны:  $\lambda_{23}p_2 + \lambda_{21}p_2 = \lambda_{12}p_1 + \lambda_{32}p_3$ . Можно сократить справа и слева равные друг другу члены и тогда получим:  $\lambda_{23}p_2 = \lambda_{32}p_3$  и далее, совершенно аналогично,  $\lambda_{34}p_3 = \lambda_{43}p_4$  и т. д.

Очевидно, для этого случая члены, соответствующие стоящим друг над другом стрелкам, равны между собой:  $\lambda_{k-1,k}p_{k-1} = \lambda_{k,k-1}p_k$ , где  $k$  принимает все значения от 2 до  $n$ .

Итак, предельные вероятности состояний в любой схеме размножения и гибели удовлетворяют уравнениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{12}p_1 = \lambda_{21}p_2 \\ \lambda_{23}p_2 = \lambda_{32}p_3 \\ \dots \\ \lambda_{k-1,k}p_{k-1} = \lambda_{k,k-1}p_k \\ \dots \\ \lambda_{n-1,n}p_{n-1} = \lambda_{n,n-1}p_n \end{array} \right.$$

и нормировочному условию:  $\sum p_i = 1$ .

Будем решать эту систему следующим образом: выразим все переменные через  $p_1$ , а именно - из первого уравнения выразим  $p_2$ :  $p_2 = (\lambda_{12} / \lambda_{21})p_1$ . Из второго получим:  $p_3 = (\lambda_{23} / \lambda_{32})p_2 = ((\lambda_{23} / \lambda_{32})(\lambda_{12} / \lambda_{21}))p_1$  и так далее. Общая формула имеет вид:

$$p_k = \frac{\lambda_{k-1,k} \lambda_{k-2,k-1} \dots \lambda_{12}}{\lambda_{k,k-1} \lambda_{k-1,k-2} \dots \lambda_{21}} p_1 \quad (10)$$

Эта формула справедлива для любого  $k$  от 2 до  $n$ . В числителе стоит произведение всех плотностей вероятности перехода (интенсивностей)  $\lambda_{ij}$ , стоящих у стрелок, направленных слева направо, с начала и вплоть до той, которая идет в состояние  $S_k$ ; в знаменателе — произведение всех интенсивностей  $\lambda_{ij}$ , стоящих у стрелок, идущих справа налево, опять-таки, с начала и вплоть до стрелки, исходящей из состояния  $S_k$ . При  $k = n$  в числи-

теле будет стоять произведение интенсивностей  $\lambda_{ij}$ , стоящих у всех стрелок, идущих слева направо, а в знаменателе — у всех стрелок, идущих справа налево.

Итак, все вероятности  $p_1, p_2, \dots, p_n$  выражены через одну из них  $p_1$ . Подставив эти выражения в нормировочное условие и вынося  $p_1$ , получаем:

$$p_1 = \frac{1}{1 + \lambda_{12}/\lambda_{21} + (\lambda_{23}/\lambda_{32})(\lambda_{12}/\lambda_{21}) + \dots + (\lambda_{n-1,n} \dots \lambda_{12})/\lambda_{n,n-1} \dots \lambda_{21}}$$

Остальные вероятности выражаются через (10). Таким образом, задача «размножения и гибели» решена в общем виде: найдены предельные вероятности состояний.

### **СИСТЕМЫ СМО, ИХ КЛАССЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Для того чтобы процесс, протекающий в системе, был марковским, нужно, чтобы все потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние, были пуассоновскими (потоками без последствия). Для СМО потоки событий — это потоки «обслуживания» заявок. Если эти потоки не являются пуассоновскими, математическое описание процессов, происходящих в СМО, становится несравненно более сложным и требует более громоздкого аппарата.

#### **КЛАССЫ СМО**

**Системы с отказами** (с потерями). В таких системах заявка, поступившая в момент, когда все каналы заняты, получает «отказ», покидает СМО и в дальнейшем процессе обслуживания не участвует.

**Системы с ожиданием** (с очередью). В таких системах заявка, поступившая в момент, когда все каналы заняты, становится в очередь и ожидает, пока не освободится один из каналов. Обслуживание (дисциплина очереди) в системе с ожиданием может быть упорядоченным (заявки обслуживаются в порядке поступления), неупорядоченным (заявки обслуживаются в случайном порядке) или стековым (первой из очереди выбирается последняя заявка). Кроме того, в некоторых СМО применяется так называемое обслуживание с приоритетом. Различают системы со статическими и динамическими приоритетами. Системы с очередью делятся на системы с неограниченным и с ограниченным ожиданием.

**В системах с неограниченным ожиданием** каждая заявка, поступившая в момент, когда нет свободных каналов, становится в очередь и «терпеливо» ждет освобождения канала, который примет ее к обслуживанию.

**В системах с ограниченным ожиданием** на пребывание заявки в очереди накладываются ограничения. Эти ограничения могут касаться как длины очереди - система с ограниченной длиной очереди, так и времени пребывания заявки в очереди - система с ограниченным временем ожидания, либо общего времени пребывания заявки в СМО.

#### **ХАРАКТЕРИСТИКИ СМО**

В зависимости от типа СМО при оценке ее эффективности могут применяться те или другие величины. Например, для СМО с отказами одной из важнейших характеристик ее продуктивности является так называемая абсолютная пропускная способность - среднее число заявок, которое может обслужить система за единицу времени.

Наряду с абсолютной часто рассматривается относительная пропускная способность СМО — средняя доля поступивших заявок, обслуживаемая системой (отношение среднего числа заявок, обслуживаемых системой в единицу времени, к среднему числу поступающих за это время заявок).

Помимо абсолютной и относительной пропускной способностей при анализе СМО с отказами интересуют и другие характеристики, например, среднее число занятых каналов; среднее относительное время простоя системы в целом и отдельного канала и т. д.

СМО с ожиданием имеют несколько другие характеристики. Очевидно, для СМО с неограниченным ожиданием как абсолютная, так и относительная пропускная способность теряют смысл, так как каждая поступившая заявка рано или поздно будет обслужена. Для такой СМО весьма важными характеристиками являются: среднее число заявок в



очереди; среднее число заявок в системе (в очереди и под обслуживанием); среднее время ожидания заявки в очереди; среднее время пребывания заявки в системе.

Для СМО с ограниченным ожиданием интерес представляют характеристики: как абсолютная и относительная пропускная способности, так и характеристики ожидания.

Для анализа процесса, протекающего в СМО, существенно знать основные параметры системы: число каналов  $n$ , интенсивность потока заявок, производительность каждого канала (среднее число заявок, обслуживаемое каналом в единицу времени), условия образования очереди (ограничения, если они есть).

## СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОТКАЗАМИ

### ОДНОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА СОТКАЗАМИ

Простейшей из всех задач теории массового обслуживания является модель одноканальной СМО с отказами (потерями). При этом система массового обслуживания состоит только из одного канала ( $n = 1$ ) и на нее поступает пуассоновский поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ , зависящей, в общем случае, от времени:  $\lambda = \lambda(t)$

Заявка, заставшая канал занятым, получает отказ и покидает систему. Обслуживание заявки продолжается в течение случайного времени  $T_{об}$ , распределенного по показательному закону с параметром  $\mu$ :  $f(t) = \mu e^{-\mu t}$  ( $t > 0$ ).

Из этого следует, что «поток обслуживания» — простейший, с интенсивностью  $\mu$ . Чтобы представить себе этот поток, вообразим один непрерывно занятый канал, который будет выдавать обслуженные заявки потоком с интенсивностью  $\mu$ .

Требуется найти:

- абсолютную пропускную способность СМО ( $A$ );
- относительную пропускную способность СМО ( $q$ ).

Рассмотрим единственный канал обслуживания как физическую систему  $S$ , которая может находиться в одном из двух состояний:  $S_0$  - свободен,  $S_1$  - занят. ГСП системы показан на рисунке 11 а.

Из состояния  $S_0$  в  $S_1$  систему переводит поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ ; из  $S_1$  в  $S_0$  - «поток обслуживания» с интенсивностью  $\mu$ . Вероятности состояний:  $p_0(t)$  и  $p_1(t)$ . Очевидно, для любого момента  $t$ :  $p_0(t) + p_1(t) = 1$ . (11)

Составим дифференциальные уравнения Колмогорова для вероятностей состояний согласно правилу, данному выше:

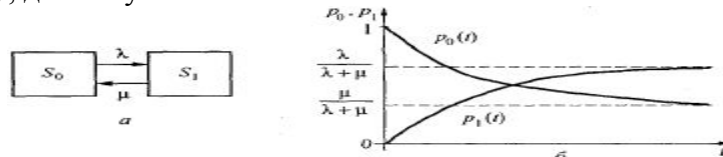


Рисунок 11 - ГСП для одноканальной СМО с отказами - а; график решения уравнения - б

$$\begin{cases} dp_0/dt = -\lambda p_0 + \mu p_1; \\ dp_1/dt = -\mu p_1 + \lambda p_0; \end{cases} \quad (12)$$

Из двух уравнений (12) одно является лишним, так как  $p_0$  и  $p_1$  связаны соотношением (11). Учитывая это, отбросим второе уравнение, а в первое подставим вместо  $p_1$  выражение  $(1-p_0)$ :  $dp_0/dt = -\lambda p_0 + \mu(1-p_0)$  или  $dp_0/dt = -(\mu+\lambda)p_0 + \mu$ . (13)

Поскольку в начальный момент канал свободен, уравнение следует решать при начальных условиях:  $p_0(0) = 1$ ,  $p_1(0) = 0$ .

Линейное дифференциальное уравнение (13) с одной неизвестной функцией  $p_0$  может быть решено не только для простейшего потока заявок ( $\lambda = \text{const}$ ), но и для случая, когда интенсивность этого потока со временем меняется.

Для первого случая решение есть:  $p_0 = \mu/(\mu+\lambda) + \lambda e^{-(\mu+\lambda)t}/(\mu+\lambda)$ .

Зависимость величины  $p_0$  от времени имеет вид, изображенный на рисунке 11 б. В начальный момент (при  $t=0$ ) канал заведомо свободен ( $p_0(0) = 1$ ). С увеличением  $t$  вероятность  $p_0$  уменьшается и в пределе (при  $t \rightarrow \infty$ ) равна  $\mu/(\mu+\lambda)$ . Величина  $p_1(t)$ , дополняющая  $p_0(t)$  до единицы, изменяется так, как показано на том же рисунке.

Для одноканальной СМО с отказами вероятность  $p_0$  есть не что иное, как относительная пропускная способность  $q$ . Действительно,  $p_0$  есть вероятность того, что в момент  $t$  канал свободен, или вероятность того, что заявка, пришедшая в момент  $t$ , будет обслужена. Следовательно, для данного момента времени  $t$  среднее отношение числа обслуженных заявок к числу поступивших также равно  $p_0(q=p_0)$ .

В пределе, при  $t \rightarrow \infty$ , когда процесс обслуживания уже установится, предельное значение относительной пропускной способности будет равно:  $q = \mu / (\mu + \lambda)$ .

Зная относительную пропускную способность  $q$ , можно найти абсолютную -  $A$ . Они связаны очевидным соотношением:  $A = \lambda q$ . В пределе, при  $t \rightarrow \infty$ , абсолютная пропускная способность тоже установится и будет равна  $A = \lambda \mu / (\mu + \lambda)$ .

Зная относительную пропускную способность системы  $q$  (вероятность того, что пришедшая в момент  $t$  заявка будет обслужена), можно найти вероятность отказа:

$$P_{\text{отк}} = 1 - q, \text{ при } t \rightarrow \infty P_{\text{отк}} = 1 - \mu / (\mu + \lambda) = \lambda / (\mu + \lambda).$$

### МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА С ОТКАЗАМИ

Рассмотрим  $n$ -канальную СМО с отказами. Будем нумеровать состояния системы по числу занятых каналов. Состояния системы:

$S_0$  - все каналы свободны;

$S_1$  - занят ровно один канал, остальные свободны;

$S_k$  - заняты ровно  $k$  каналов, остальные свободны;

$S_n$  - заняты  $n$  каналов.

ГСП СМО представлен на рисунке 12. Около стрелок поставлены интенсивности соответствующих потоков событий. По стрелкам слева направо - поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ . Если система находится в состоянии  $S_k$  (занято  $k$  каналов) и пришла новая заявка, то система переходит в состояние  $S_{k+1}$ .

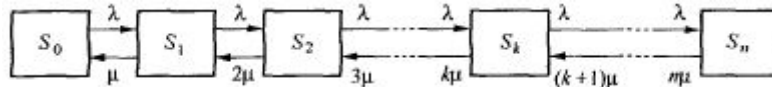


Рисунок 12 - ГСП для многоканальной СМО с отказами

Определим интенсивности потоков событий, переводящих систему по стрелкам справа налево. Пусть система находится в состоянии  $S_1$  (занят один канал). Тогда, как только закончится обслуживание заявки, занимающей этот канал, система перейдет в  $S_0$ ; значит, поток событий, переводящий систему по стрелке  $S_1 - S_0$ , имеет интенсивность  $\mu$ .

Если обслуживанием занято два канала, то поток обслуживания, переводящий систему по стрелке  $S_2 - S_1$  будет вдвое интенсивнее -  $2\mu$ ; если занято  $k$  каналов - в  $k$  раз интенсивнее -  $k\mu$ . Соответствующие интенсивности указаны у стрелок справа налево.

Из рисунка 7 видно, что процесс, протекающий в СМО, представляет собой частный случай процесса размножения и гибели, рассмотренного выше. Пользуясь общими правилами, можно составить уравнения Колмогорова для вероятностей состояний:

$$\begin{cases} dp_0/dt = -\lambda p_0 + \mu p_1; \\ dp_1/dt = -(\lambda + \mu)p_1 + \lambda p_0 + 2\mu p_2; \\ dp_2/dt = -(\lambda + 2\mu)p_2 + \lambda p_1 + 3\mu p_3; \\ \dots \\ dp_k/dt = -(\lambda + k\mu)p_k + \lambda p_{k-1} + (k+1)\mu p_{k+1}; \\ \dots \\ dp_n/dt = -n\mu p_n + \lambda p_{n-1}; \end{cases} \quad (14)$$

Уравнения (14) называют уравнениями Эрланга. Поскольку при  $t=0$  система свободна, начальными условиями для их решения являются:  $p_0(0)=1$ ;  $p_1(0)=p_2(0)=\dots=p_n(0)=0$ .

Интегрирование системы уравнений (14) в аналитическом виде довольно сложно; на практике такие системы дифференциальных уравнений обычно решаются численно.

Наибольший интерес представляют предельные вероятности состояний  $p_0, p_1, \dots, p_k, \dots, p_n$ , характеризующие установившийся режим СМО (при  $t \rightarrow \infty$ ). Для нахождения предельных вероятностей воспользуемся ранее полученными соотношениями (10).

$$\begin{cases} p_k = \lambda^k p_0 / (\mu \cdot 2\mu \cdot \dots \cdot k\mu) = (\lambda/\mu)^k p_0 / k!; & (k=1, 2, \dots, n); \\ p_0 = 1 / (1 + (\lambda/\mu) + (\lambda/\mu)^2/2! + \dots + (\lambda/\mu)^n/n!). \end{cases} \quad (15)$$

В этих формулах интенсивность потока заявок  $\lambda$  и интенсивность потока обслуживания (для одного канала)  $\mu$  не фигурируют по отдельности, а входят только своим отношением  $\lambda/\mu$ . Это отношение обозначается  $\rho$ :  $\rho = \lambda/\mu$  и называется приведенной интенсивностью потока заявок. Величина  $\rho$  представляет собой среднее число заявок, приходящих в СМО за среднее время обслуживания одной заявки.

С учетом этого обозначения, соотношения (15) принимают вид:

$$\begin{cases} p_k = \rho^k p_0 / k!; & (k=1, 2, \dots, n); \\ p_0 = 1 / (1 + \rho/1! + \rho^2/2! + \dots + \rho^n/n!) = (1 + \rho/1! + \rho^2/2! + \dots + \rho^n/n!)^{-1} = e^{-\rho}. \end{cases} \quad (16)$$

Соотношения (16) называются формулами Эрланга. Они выражают предельные вероятности всех состояний системы в зависимости от параметров  $\lambda$ ,  $\mu$  и  $n$ .

Имея вероятности состояний  $p_0, p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_n$ , можно найти характеристики эффективности СМО: относительную пропускную способность  $q$ , абсолютную пропускную способность  $A$  и вероятность отказа  $P_{\text{отк}}$ .

**Вероятность отказа.** Заявка получает отказ, если приходит в момент, когда все  $n$  каналов заняты. Вероятность этого равна  $P_{\text{отк}} = \rho^n p_0 / n!$ . (17)

**Относительная пропускная способность.** Вероятность того, что заявка будет принята к обслуживанию:  $q = 1 - p_n$ .

**Абсолютная пропускная способность:**  $A = \lambda q = \lambda(1 - p_n)$ .

**Среднее число заявок в системе.** Одной из важных характеристик СМО с отказами является среднее число занятых каналов  $k^-$  (в данном случае оно совпадает со средним числом заявок, находящихся в системе). Величину  $k^-$  можно вычислить через вероятности  $p_0, p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_n$  по формуле  $k^- = 0 \cdot p_0 + 1 \cdot p_1 + \dots + n p_n$  как математическое ожидание дискретной случайной величины и абсолютную пропускную способность  $A$ , которая уже известна. Действительно,  $A$  есть не что иное, как среднее число заявок, обслуживаемых в единицу времени; один занятый канал обслуживает в среднем за единицу времени  $\mu$  заявок; среднее число занятых каналов получится делением  $A$  на  $\mu$ :  $k^- = A/\mu = \lambda(1 - p_n)/\mu$  или, переходя к обозначению  $\rho = \lambda/\mu$ ,  $k^- = \rho(1 - p_n)$ . (18)

## СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОЖИДАНИЕМ

### ОДНОКАНАЛЬНАЯ СМО С ОЖИДАНИЕМ

Рассмотрим простейшую СМО с ожиданием - одноканальную систему  $(n-1)$ , в которую поступает поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ ; интенсивность обслуживания  $\mu$  (в среднем непрерывно занятый канал будет выдавать  $\lambda/\mu$  обслуженных заявок в единицу времени). Заявка, поступившая в момент, когда канал занят, становится в очередь.

**Система с ограниченной длиной очереди.** Предположим, что количество мест в очереди ограничено числом  $m$ , т.е. если заявка пришла в момент, когда в очереди уже стоят  $m$  заявок, она покидает систему необслуженной. Далее, устремив  $m$  к бесконечности, получим характеристики одноканальной СМО без ограничений длины очереди.

Будем нумеровать состояния СМО по числу заявок, находящихся в системе:

$S_0$  - канал свободен;

$S_1$  - канал занят, очереди нет;

$S_2$  - канал занят, одна заявка стоит в очереди;

$S_k$  - канал занят,  $k - 1$  заявок стоят в очереди;

$S_{m+1}$  - канал занят,  $m$  заявок стоят в очереди.

ГСП показан на рисунке 12. Все интенсивности потоков событий, переводящих в систему по стрелкам слева направо, равны  $\lambda$ , а справа налево -  $\mu$  (слева направо - поток заявок, справа налево — поток «освобождений» занятого канала).

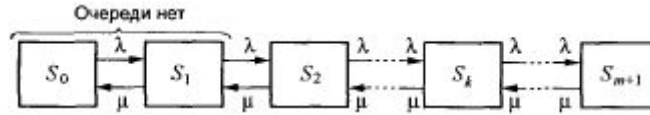


Рисунок 13 - Одноканальная СМО с ожиданием

Изображенная на рисунке 13 схема представляет собой схему размножения и гибели. Используя общее решение (10), (15), напишем выражения для предельных вероятностей состояний:

$$p_k = (\lambda/\mu)^k p_0; (k=1,2,\dots,m+1);$$

$$p_0 = 1/(1+(\lambda/\mu)+(\lambda/\mu)^2+\dots+(\lambda/\mu)^{m+1}) \quad (19)$$

или с использованием  $\rho = \lambda/\mu$ :

$$p_k = \rho^k p_0; (k=1,2,\dots,m+1);$$

$$p_0 = 1/(1+\rho+\rho^2+\dots+\rho^{m+1}). \quad (20)$$

Последняя строка содержит геометрическую прогрессию с первым членом 1 и знаменателем  $\rho$ ; откуда получаем:  $p_0 = 1/(1-\rho^{m+2})/(1-\rho) = (1-\rho)/(1-\rho^{m+2})$ . (21)

Предельные вероятности принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} p_0 &= (1-\rho)/(1-\rho^{m+2}); \\ p_1 &= \rho p_0; \\ p_2 &= \rho^2 p_0; \\ &\dots \\ p_k &= \rho^k p_0; \\ &\dots \\ p_{m+1} &= \rho^{m+1} p_0; \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Выражение (21) справедливо только при  $\rho < 1$  (при  $\rho = 1$  она дает неопределенность вида  $0/0$ ). Сумма геометрической прогрессии со знаменателем  $\rho = 1$  равна  $m+2$ , и в этом случае  $p_0 = 1/(m+2)$ .

Определим характеристики СМО: вероятность отказа, относительную пропускную способность  $q$ , абсолютную пропускную способность  $A$ , среднюю длину очереди, среднее число заявок, связанных с системой, среднее время ожидания в очереди, среднее время пребывания заявки в СМО

**Вероятность отказа.** Очевидно, заявка получает отказ только в случае, когда канал занят и все  $m$  мест в очереди тоже:  $P_{отк} = p_{m+1} = (\rho^{m+1} (1-\rho))/(1-\rho^{m+2})$ . (23)

**Относительная пропускная способность:**  $q = 1 - P_{отк} = 1 - (\rho^{m+1} (1-\rho))/(1-\rho^{m+2})$ . (24)

**Абсолютная пропускная способность:**  $A = \lambda q$ .

**Средняя длина очереди.** Найдем среднее число  $r$  заявок, находящихся в очереди, как математическое ожидание дискретной случайной величины  $R$  - числа заявок, находящихся в очереди:  $r^- = M[R]$ . С вероятностью  $p_2$  в очереди стоит одна заявка, с вероятностью  $p_3$  - две заявки, вообще с вероятностью  $p_k$  в очереди стоят  $k-1$  заявка, и т. д., откуда:

$$r^- = M[R] = \sum \rho^k p_0 = \rho^2 p_0 \sum (k-1) \rho^{k-2} = \rho^2 p_0 \sum k \rho^{k-1}. \quad (25)$$

Поскольку,  $k \rho^{k-1} = d \rho^k / d \rho$  сумму можно трактовать как производную по  $\rho$  от суммы геометрической прогрессии:  $\sum k \rho^{k-1} = \sum \rho^k = (\rho - \rho^{m+1}) / (1-\rho) = (1 - (m+1-m\rho)\rho^m) / (1-\rho)^2$ .

Подставляя данное выражение в (25) и используя  $p_0$  из (22), получаем:

$$r^- = \rho^2 (1 - (m+1-m\rho)\rho^m) / ((1-\rho)(1-\rho^{m+2})). \quad (26)$$

**Среднее число заявок  $k$** , связанных с системой (как стоящих в очереди, так и находящихся на обслуживании). Поскольку  $k^- = r^- + w^-$ , где  $w^-$  - среднее число заявок, находящихся под обслуживанием, то остается определить  $w^-$ . Так как канал один, число обслуживаемых заявок может быть 0 с вероятностью  $p_0$  или 1 с вероятностью  $1 - p_0$ . Откуда:  $w = 0 \cdot p_0 + 1 \cdot (1-p_0) = (\rho - \rho^{m+2}) / (1-\rho^{m+2})$  и среднее число заявок, связанных с СМО, равно:

$$k^- = r^- + (\rho - \rho^{m+2}) / (1-\rho^{m+2}). \quad (27)$$

**Среднее время ожидания заявки в очереди  $t_{ож}$** ; заявка будет ждать начала своего обслуживания в течение времени  $1/\mu$  (среднее время обслуживания одной заявки). С вероятностью  $p_2$  в очереди перед рассматриваемой заявкой будет стоять еще одна, и время ожидания в среднем будет равно  $2/\mu$  и т. д.

Если  $k = m + 1$  (приходящая заявка застаёт канал обслуживания занятым и  $m$  заявок в очереди), то в этом случае заявка не становится в очередь (и не обслуживается), поэтому время ожидания равно нулю. Среднее время ожидания будет равно:

$$t_{ож} = p_1(1/\mu) + p_2(2/\mu) + \dots + p_k(k/\mu) + \dots + P_m(m/\mu)$$

Если подставить сюда выражения для вероятностей (22), получим:

$$t_{ож}^- = p_0 \rho(1/\mu) + p_0 \rho^2(2/\mu) + \dots + p_0 \rho^k(k/\mu) + \dots + P_0 \rho^m(m/\mu) = \rho(1 - (m+1 - m\rho)\rho^m) / \mu(1-\rho)(1-\rho^{m+2}). \quad (28)$$

Здесь использованы соотношения (25, 26) (производная геометрической прогрессии), а также  $p_0$  из (22). Сравнивая это выражение с (26), имеем, что среднее время ожидания равно среднему числу заявок в очереди, деленному на интенсивность потока заявок.

$$t_{ож}^- = (1/\rho\mu) \bar{r} = \bar{r} / \lambda. \quad (29)$$

**Среднее время пребывания заявки в системе.** Обозначим  $t_{смo}^-$  - матожидание случайной величины - время пребывания заявки в СМО, которое складывается из среднего времени ожидания в очереди  $t_{ож}$  и среднего времени обслуживания  $t_{обсл}$ . Если загрузка системы составляет 100 %, очевидно,  $t_{обсл} = 1/\mu$ , в противном же случае  $t_{обсл} = q/\mu$ .

Отсюда  $t_{смo}^- = t_{ож}^- + t_{обсл} = \bar{r} / \lambda + q/\mu$ .

**Пример.** Автозаправочная станция (АЗС) представляет собой СМО с одним каналом обслуживания (одной колонкой). Площадка при станции допускает пребывание в очереди на заправку не более трех машин одновременно ( $m=3$ ). Если в очереди уже находятся три машины, очередная машина, прибывшая к станции, в очередь не становится. Поток машин, прибывающих для заправки, имеет интенсивность  $\lambda = 1$  (машина в минуту). Процесс заправки продолжается в среднем 1,25 мин. Определить: вероятность отказа; относительную и абсолютную пропускную способности АЗС; среднее число машин, ожидающих заправки; среднее число машин, находящихся на АЗС (включая обслуживаемую); среднее время ожидания машины в очереди; среднее время пребывания машины на АЗС (включая обслуживание).

Находим вначале приведенную интенсивность потока заявок:  $\mu = 1/1,25 = 0,8$ ;  $\rho = \lambda/\mu = 1/0,8 = 1,25$ . По формулам (22):  $p_0 = 0,122$ ;  $p_1 = 0,152$ ;  $p_2 = 0,191$ ;  $p_3 = 0,238$ ;  $p_4 = 0,297$ .

Вероятность отказа  $P_{отк} = 0,297$ .

Относительная пропускная способность СМО  $q = 1 - P_{отк} = 0,703$ .

Абсолютная пропускная способность СМО  $A = \lambda q = 0,703$  машины в мин.

Среднее число машин в очереди находим по формуле (26).

$$\bar{r} = (1,25^2(1 - (3+1-3 \cdot 75)1,25^3)) / (1-1,25)(1-1,25^5) = 1,56.$$

Число машин, находящихся под обслуживанием

$$w^- = (\rho - \rho^{m+2}) / (1 - \rho^{m+2}) = (1,25 - 1,25^5) / (1 - 1,25^5) = 0,88.$$

Среднее время, которое машина проводит на АЗС:  $t_{смo}^- = 1,56 + 0,88 = 2,44$  мин.

**Системы с неограниченным ожиданием.** В таких системах значение  $m$  не ограничено и, следовательно, основные характеристики могут быть получены путем предельного перехода в ранее полученных выражениях (19, 20). Знаменатель в формуле (20) представляет собой сумму бесконечного числа членов геометрической прогрессии. Эта сумма сходится при  $\rho < 1$  (предельный установившийся режим). Поэтому в дальнейшем  $\rho = \lambda/\mu < 1$ . Если  $m \rightarrow \infty$ , то соотношения (22) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} p_0 &= (1-\rho); \\ p_1 &= \rho(1-\rho); \\ p_2 &= \rho^2(1-\rho); \\ &\dots \\ p_k &= \rho^k(1-\rho). \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

При отсутствии ограничений по длине очереди каждая заявка, пришедшая в систему, будет обслужена, поэтому  $q = 1$ ,  $A = \lambda q = \lambda$ .

**Среднее число заявок в очереди** получим из (26) при  $m \rightarrow \infty$ :  $\bar{r}^- = \rho^2 / (1 - \rho)$ .

**Среднее число заявок в системе** по формуле (27) при  $m \rightarrow \infty$ :

$$\bar{k}^- = \bar{r}^- + \rho = \rho^2 / (1 - \rho) + \rho = \rho / (1 - \rho).$$



**Среднее время ожидания**  $\bar{t}_{ож}$  получим из формулы (28) при  $m \rightarrow \infty$ :  $\bar{t}_{ож} = \rho/\mu(1-\rho)$ .  
**Среднее время пребывания заявки в СМО** есть  $t_{смo} = t_{ож} + t_{обсл} = 1/\mu(1-\rho)$ .

### МНОГОКАНАЛЬНАЯ СМО С ОЖИДАНИЕМ

#### СИСТЕМА С ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНОЙ ОЧЕРЕДИ

Рассмотрим  $n$  - канальную СМО с ожиданием, на которую поступает поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ ; интенсивность обслуживания (для одного канала)  $\mu$ ; число мест в очереди  $m$ . Состояния системы нумеруются по числу заявок, связанных системой: нет очереди:

- $S_0$  - все каналы свободны;
- $S_1$  - занят один канал, остальные свободны;
- $S_k$  - заняты  $k$  каналов, остальные нет;
- $S_n$  - заняты все  $n$  каналов, свободных нет;

есть очередь:

- $S_{n+1}$  - заняты все  $n$  каналов; одна заявка стоит в очереди;
- $S_{n+r}$  - заняты все  $n$  каналов,  $r$  заявок в очереди;
- $S_{n+m}$  - заняты все  $n$  каналов,  $m$  заявок в очереди.

ГСП приведен на рисунке 14. У каждой стрелки проставлены соответствующие интенсивности потоков событий. По стрелкам слева направо -  $\lambda$ , по стрелкам справа налево  $\mu$ , умноженному на число занятых каналов.

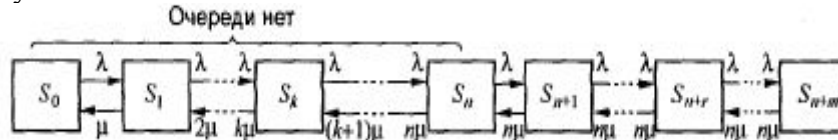


Рисунок 14 - Многоканальная СМО с ожиданием

Выражения для вероятностей:

$$\begin{cases} p_k = \rho^k p_0 / k!, & (k=1, 2, \dots, n); \\ p_{n+i} = \rho^{n+i} p_0 / n! i!, & (i=1, 2, \dots, m); \\ p_0 = (1 + \rho/1! + \rho^2/2! + \dots + \rho^n/n! + \dots + \rho^{n+m}/n^m n!)^{-1}. \end{cases} \quad (31)$$

**Вероятность отказа.** Поступившая заявка получает отказ, если заняты все  $n$  каналов и все  $m$  мест в очереди:  $P_{отк} = P_{n+m} = (\rho^{n+m}/n^m n!) p_0$ . (32)

**Относительная пропускная способность:**  $q = 1 - P_{отк} = 1 - (\rho^{n+m}/n^m n!) p_0$ . (33)

**Абсолютная пропускная способность СМО:**  $A = \lambda q = \lambda(1 - (\rho^{n+m}/n^m n!) p_0)$ . (34)

**Среднее число занятых каналов.** Обозначим среднее число занятых каналов  $\bar{z}$ . Каждый занятый канал обслуживает в среднем  $\mu$  заявок в единицу времени, а СМО в целом обслуживает в среднем  $A$  заявок в единицу времени. Разделив одно на другое, получим:  $\bar{z} = A/\mu = (\lambda/\mu)(1 - (\rho^{n+m}/n^m n!) p_0)$ .

**Среднее число заявок в очереди** можно вычислить непосредственно как математическое ожидание дискретной случайной величины:

$$r = 1p_{n+1} + 2p_{n+2} + \dots + mp_{n+m} = (\rho^{n+1}/n!) p_0 (1 + 2\chi + 3\chi^2 + \dots + m\chi^{m-1}), \text{ где } \chi = \rho/n. \quad (35)$$

Опять встречается производная суммы геометрической прогрессии (25, 26 - 28), используя соотношение для нее, получаем:  $r = (\rho^{n+1} p_0)(1 - \chi^m(m+1 - m\chi))/n!(1 - \chi)^2$

**Среднее число заявок в системе:**  $k = r + \bar{z}$ .

**Среднее время ожидания заявки в очереди.** Если заявка придет в момент, когда заняты все  $n$  каналов, а очереди нет, ей придется ждать в среднем время, равное  $1/n\mu$  («поток освобождений»)  $n$  каналов имеет интенсивность  $n\mu$ ). Если все каналы заняты и одна заявка в очереди, то придется в среднем ждать в течение времени  $2/n\mu$ . Если заявка застанет в очереди  $k$  заявок, ей придется ждать в среднем в течение времени  $k/n\mu$ . Среднее время ожидания:

$$\bar{t}_{ож} = 1p_n/n\mu + 2p_{n+1}/n\mu + \dots + mp_{n+m-1}/n\mu = (\rho^n p_0 / n\mu n!)(1 + 2\rho/n + 3(\rho/n)^2 + \dots + m(\rho/n)^{m-1}). \quad (36)$$

Так же, как и в случае одноканальной СМО с ожиданием, это выражение отличается от выражения для средней длины очереди (35) только множителем:

$$t_{ож} = (r / \lambda) = (\rho^n p_0 / n\mu n!)(1 - \chi^m (m+1 - m\chi)) / (1 - \chi)^2.$$

**Среднее время пребывания заявки в системе**  $t_{СМО} = t_{ож} + t_{обсл} = t_{ож} + q/\mu$ .

#### СИСТЕМА С НЕОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНОЙ ОЧЕРЕДИ

Как и ранее, при анализе систем без ограничений необходимо рассмотреть полученные соотношения при  $m \rightarrow \infty$ .

Вероятности состояний получим из формул (31) предельным переходом (при  $m \rightarrow \infty$ ). Заметим, что сумма соответствующей геометрической прогрессии сходится при  $\chi = \rho/n < 1$  и расходится при  $\chi > 1$ . Допустив, что  $\chi < 1$  и устремив в формулах (31) величину  $m$  к бесконечности, получим выражения для предельных вероятностей состояний:

$$\begin{cases} p_k = \rho^k p_0 / k!, & (k=1, 2, \dots, n); \\ p_{n+i} = \rho^{n+i} p_0 / n! n!, & (i=1, 2, \dots, m); \\ p_0 = (1 + \rho/1! + \rho^2/2! + \dots + \rho^n/n! + \dots + \rho^{n+1}/(n-p) n!)^{-1}. \end{cases} \quad (37)$$

**Вероятность отказа, относительная и абсолютная пропускная способность.**

Так как каждая заявка рано или поздно будет обслужена, то характеристики пропускной способности СМО составят:  $P_{отк} = 0$ ;  $q = 1$ ;  $A = \lambda q = \lambda$ .

**Среднее число заявок в очереди** получим из (35):  $r = (\rho^{n+1} p_0) / n n! (1 - \chi)^2$ .

**Среднее время ожидания** - из (36):  $t_{ож} = (\rho^n p_0 / n\mu n!) / (1 - \chi)^2$ .

**Среднее число занятых каналов**, как и ранее, определяется через абсолютную пропускную способность:  $z = A/\mu = (\lambda/\mu) = \rho$ .

**Среднее число заявок**, связанных с СМО, определяется как среднее число заявок в очереди плюс среднее число заявок, находящихся под обслуживанием:  $k = r + z$ .

**Пример.** Автозаправочная станция с двумя колонками ( $n=2$ ) обслуживает поток машин с интенсивностью  $\lambda = 0,8$  (машин в минуту). Среднее время обслуживания одной машины  $t_{обсл} = 1/\mu = 2$  мин. В районе нет других АЗС, поэтому очередь машин перед АЗС может расти практически неограниченно. Найти характеристики СМО. Имеем:  $n=2$ ;  $\lambda = 0,8$ ;  $\mu = 1/t_{обсл} = 0,5$ ;  $\rho = 1,6$ ;  $\chi = \rho/n = 0,8$ .

Поскольку  $\chi < 1$ , очередь не растет безгранично и имеет смысл говорить о предельном стационарном режиме работы СМО. По формулам (37) находим вероятности состояний:  $p_0 = (1 + 1,6 + 1,28 + 4,09 / (2 \cdot 0,4)) = 0,11$ ;  $p_1 = 1,6 p_0 = 0,178$ ;  $p_2 = 1,28 p_0 = 0,142$ .

Среднее число занятых каналов найдем, разделив абсолютную пропускную способность СМО  $A = 0,8$  на интенсивность обслуживания  $= 0,5$ :  $z = 0,8 / 0,5 = 1,6$ .

Вероятность отсутствия очереди у АЗС будет:  $p_0 + p_1 + p_2 = 0,431$ .

Среднее число машин в очереди:  $r = (1,6^3 \cdot 0,111) / (2 \cdot 2 \cdot 0,4^2) = 0,71$ .

Среднее число машин на АЗС:  $k = 0,71 + 1,6 = 2,31$ .

Среднее время ожидания в очереди:  $t_{ож} = 0,89$  мин.

Среднее время пребывания машины на АЗС:  $t_{СМО} = 0,89 + 2 = 2,89$  мин.

#### СИСТЕМА С ОГРАНИЧЕННЫМ ВРЕМЕНЕМ ОЖИДАНИЯ

Ранее рассматривались системы с ожиданием, ограниченным только длиной очереди (числом  $m$  заявок, одновременно находящихся в очереди). В такой СМО заявка, раз ставшая в очередь, не покидает ее, пока не дожидается обслуживания. На практике встречаются СМО другого типа, в которых заявка, подождав некоторое время, может уйти из очереди (так называемые «нетерпеливые» заявки).

Рассмотрим СМО подобного типа, предполагая, что ограничение времени ожидания является случайной величиной.

Имеется  $n$ -канальная СМО с ожиданием, в которой число мест в очереди не ограничено, но время пребывания заявки в очереди является некоторой случайной величиной со средним значением  $t_{оч}$ . Таким образом, на каждую заявку, стоящую в очереди, действует своего рода пуассоновский «поток уходов» с интенсивностью  $\nu = 1/t_{оч}$ .

Если поток пуассоновский, то процесс, протекающий в СМО, будет марковским. Найдем вероятности состояний. Нумерация состояний системы связывается с числом заявок в системе - как обслуживаемых, так и стоящих в очереди:

- $S_0$  - все каналы свободны;
  - $S_1$  - занят один канал;
  - $S_2$  - заняты два канала;
  - $S_n$  - заняты все  $n$  каналов; есть очередь;
  - $S_{n+1}$  - заняты все  $n$  каналов, одна заявка стоит в очереди;
  - $S_{n+r}$  - заняты  $n$  каналов,  $r$  заявок стоят в очереди.
- Граф состояний и переходов системы показан на рисунке 15.

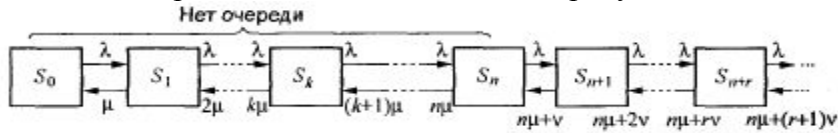


Рисунок 15 - СМО с ограниченным временем ожидания

У всех стрелок, ведущих слева направо, будет стоять интенсивность потока заявок  $\lambda$ . Для состояний без очереди у стрелок, ведущих из них справа налево, будет, как и раньше, стоять суммарная интенсивность потока обслуживания всех занятых каналов. Что касается состояний с очередью, то у стрелок, ведущих из них справа налево, будет стоять суммарная интенсивность потока обслуживания всех  $n$  каналов  $n\mu$  плюс соответствующая интенсивность потока уходов из очереди. Если в очереди стоят  $r$  заявок, то суммарная интенсивность потока уходов будет равна  $rv$ .

Как видно из графа, имеет место схема размножения и гибели; применяя общие выражения для предельных вероятностей состояний в этой схеме, используя сокращенные обозначения  $(\lambda/\mu)=\rho, \beta=v/\mu$ , запишем:

$$\begin{aligned}
 p_k &= \rho^k p_0 / k!, \quad (k=1, 2, \dots, n); \\
 p_{n+i} &= \rho^{n+i} p_0 / n!(n+\beta)(n+2\beta)\dots(n+i\beta), \quad (i=1, 2, \dots, m); \\
 p_0 &= (1 + \rho/1! + \rho^2/2! + \dots + \rho^n/n! + \dots + \rho^n/n!(\rho/(n+\beta) + \rho^2/(n+\beta)(n+2\beta) + \dots + \rho^r/(n+\beta)(n+2\beta)\dots(n+r\beta)))^{-1}.
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

Отметим некоторые особенности СМО с ограниченным ожиданием.

Если длина очереди не ограничена и заявки «терпеливы» (не уходят из очереди), то стационарный предельный режим существует только в случае  $\rho < n$  (при  $\rho \geq n$  соответствующая бесконечная геометрическая прогрессия расходится, что физически соответствует неограниченному росту очереди при  $t \rightarrow \infty$ ).

Напротив, в СМО с «нетерпеливыми» заявками, уходящими рано или поздно из очереди, установившийся режим обслуживания при  $t \rightarrow \infty$  достигается всегда, независимо от приведенной интенсивности потока заявок  $\rho$ . Это следует из того, что ряд для  $p_0$  в знаменателе формулы (38) сходится при любых положительных значениях  $\rho$  и  $\beta$ .

Для СМО с «нетерпеливыми» заявками понятие «вероятность отказа» не имеет смысла - каждая заявка может и не дожидаться обслуживания, уйдя раньше времени.

**Среднее число заявок в очереди.** Подсчитаем, какое в среднем число заявок покидает очередь досрочно. Для этого вычислим среднее число заявок в очереди:

$$r = 1p_{n+1} + 2p_{n+2} + \dots + rp_{n+r} + \dots \tag{39}$$

На каждую из заявок действует «поток уходов» с интенсивностью  $v$ . Значит, из среднего числа  $r$  заявок в очереди в среднем будет уходить  $vr$  заявок в единицу времени, и всего в единицу времени в среднем будет обслуживаться  $A = \lambda - vr$  заявок.

**Относительная пропускная способность** СМО будет составлять:

$$q = A/\lambda = (\lambda - vr)/\lambda = 1 - (vr)/\lambda.$$

**Среднее число занятых каналов**  $\bar{z}$  по-прежнему получаем, деля абсолютную пропускную способность  $A$  на  $\mu$ :  $\bar{z} = A/\mu = (\lambda - vr)/\mu = \rho - r\beta$ . (40)

**Среднее число заявок в очереди.** Соотношение (40) позволяет вычислить среднее число заявок в очереди, не суммируя бесконечного ряда (39). Из (40) получаем:  $r = \rho/\beta -$

$\bar{r}/\beta$ , а среднее число занятых каналов можно найти как математическое ожидание случай-  
ной величины  $Z$ , принимающей значения  $0, 1, 2, \dots, n$  с вероятностями  $p_0, p_1, p_2, \dots$ :

$$\bar{z} = 0p_0 + 1p_1 + 2p_2 + \dots + n(1 - (p_0 + p_1 + p_2 + \dots + p_{n-1})) = p_1 + 2p_2 + \dots + n(1 - (p_0 + p_1 + \dots + p_{n-1})). \quad (41)$$

## МОДЕЛИ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

### МОДЕЛЬ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СМО С ОТКАЗАМИ НА GPSS

В пакете GPSS для представления моделируемой системы в виде машинной модели используется язык блок-диаграмм. **Формально математическая модель системы в языках моделирования не используется, так как языки и системы позволяют непосредственно переходить от содержательного описания системы к составлению модели.** Набор блоков для блок-диаграмм однозначно определяет наборы операторов языка, осуществляющих описание структуры моделируемой системы и логических правил, определяющих ее функционирование. В блок-диаграммах блоки представляют собой выполняемые над динамическими объектами операции, а связи-стрелки между блоками отражают маршруты передвижения данных объектов по системе.

**Таким образом, процесс создания модели на языке GPSS сводится к декомпозиции исходной системы до уровня элементарных операций GPSS, формированию фиксированной схемы, отражающей последовательность элементарных операций, выполняемых над динамическими объектами (транзактами), и определению набора логико-вероятностных правил продвижения потоков объектов по имеющейся схеме.**

**Пример.** В парикмахерскую с 3 мастерами приходят клиенты двух типов. Клиенты первого типа желают стричься, интервал времени их прихода равен  $8 \pm 5$  минут. Клиенты второго типа хотят бриться, они приходят в интервале  $5 \pm 2$  минут. Первый мастер стрижёт и бреет. На стрижку идет  $15 \pm 5$  минут, на бритьё -  $12 \pm 5$  минут. Второй мастер только стрижет, а третий только бреет. Стоимость стрижки 250 руб., стоимость бритья - 100 р. Смоделировать работу парикмахерской в течение 8 - часового рабочего дня без перерыва.

#### НОРМАТИВЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Вводим нормативы обслуживания по стрижке и бритью. Норматив по стрижке выбираем в пределах  $(10 \pm 5 - 20 \pm 5)$  минут, норматив по бритью –  $(7 \pm 5 - 17 \pm 5)$  минут. Время обслуживания в заданных нормативах определяет квалификацию мастера.

#### ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ

Ограничения: очереди к мастерам по потокам не должны превышать 5 человек, загрузка мастеров не должна быть больше 0.95.

#### ТАБЛИЦА ОПРЕДЕЛЕНИЙ (таблица 1)

Таблица 1 – Определение элементов системы

Элементы GPSS	Назначение
Приборы:	
M <sub>1</sub>	Мастер и бреет, и стрижёт
M <sub>2</sub>	Мастер только стрижет
M <sub>3</sub>	Мастер только бреет
Очереди:	
L <sub>1</sub>	Клиенты стричься к первому мастеру
L <sub>2</sub>	Клиенты бриться к первому мастеру
L <sub>3</sub>	Клиенты стричься ко второму мастеру
L <sub>4</sub>	Клиенты бриться к третьему мастеру
Out 1	Уход клиентов ввиду большой очереди на стрижку
Out 2	Уход клиентов ввиду большой очереди на бритьё

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ (рисунок 16)**

Клиенты первого типа (поток 1)

Клиенты второго типа (поток 2)

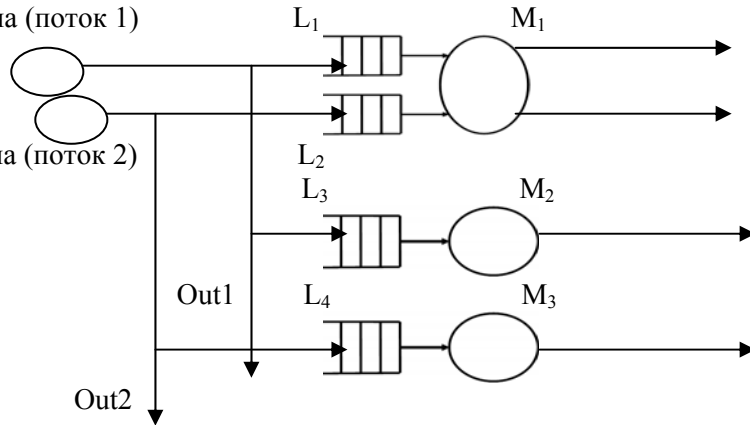
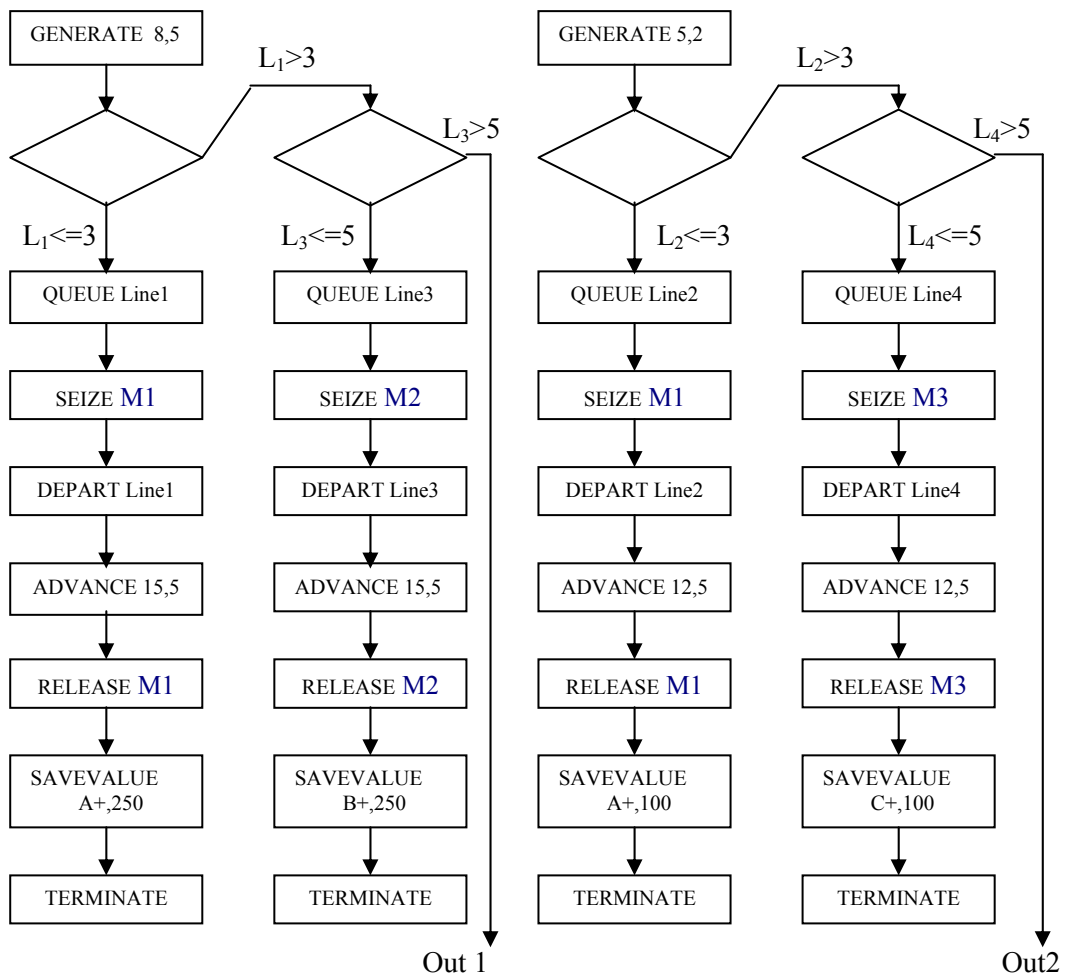


Рисунок 16 – Схема имитационной модели

**БЛОК-ДИАГРАММА НА GPSS**



В блок-диаграмме оператор GENERATE 8,5 означает приход клиентов 1-го типа, GENERATE 5,2 - 2-го типа. Последовательный набор блоков – операторов: QUEUE - присоединение к очереди, SEIZE - занятие кресла, DEPART - уход из очереди, ADVANCE - обслуживание, RELEASE - освобождение кресла, SAVEVALUE – выручка, TERMINATE - уход из парикмахерской определяет процесс обслуживания.

**ТЕКСТ GPSS - ПРОГРАММЫ**

```

SIMULATE
***** 1 СЕГМЕНТ – КЛИЕНТЫ ПЕРВОГО ТИПА *****
GENERATE      8,5                ; Приход клиентов первого типа
IF QSLINE1>3,MET1              ; Проверка длины очереди
QUEUE        LINE1
SEIZE        M1
    
```



```

DEPART      LINE1
ADVANCE     15,5           ; Обслуживание клиентов первого типа
RELEASE     M1
SAVEVALUE   A+,250
TERMINATE
MET1  IF Q$LINE3>3,OUT1           ; Проверка длины очереди
QUEUE      LINE3
SEIZE      M2
DEPART     LINE3
ADVANCE    15,5           ; Обслуживание клиентов первого типа
RELEASE    M2
SAVEVALUE  B+,250
TERMINATE
***** 2 СЕГМЕНТ – КЛИЕНТЫ ВТОРОГО ТИПА *****
GENERATE    5,2           ; Приход клиентов второго типа
IF Q$LINE2>3,MET2
QUEUE      LINE2
SEIZE      M1
DEPART     LINE2
ADVANCE    12,5
RELEASE    M1           ; Обслуживание клиентов второго типа
SAVEVALUE  A+,100
TERMINATE
MET2  IF Q$LINE4>3,OUT2           ; Проверка длины очереди
QUEUE      LINE4
SEIZE      M3
DEPART     LINE4
ADVANCE    12,5           ; Обслуживание клиентов второго типа
RELEASE    M3
SAVEVALUE  C+,100
TERMINATE
***** 3 СЕГМЕНТ – КЛИЕНТЫ, ПОКИНУВШИЕ ПАРИКМАХЕРСКУЮ *****
OUT1  SAVEVALUE  D+,1
TERMINATE
OUT2  SAVEVALUE  E+,1
TERMINATE
***** 4 СЕГМЕНТ - ТАЙМЕР *****
GENERATE    480           ; Задание времени моделирования
TERMINATE   1
START       1
END

```

## ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Facility	Average utilization	Number entries	Average time/trans
M1	0.99	36	13.24
M2	0.91	29	25.01
M3	0.61	25	11.62

Queue <AD set>	Maximum contents	Average contents	Total entries	Zero entries	Percent zeros
LINE1	4	3.64	22	1	4.55
LINE3	4	2.38	32	1	3.13
LINE2	4	3.62	21	0	0.00
LINE4	1	0.10	25	13	52.00

Queue <AD set>	Average time/trans	%Average time/trans	Current contents
LINE1	79.31	83.09	4
LINE3	35.76	36.92	3
LINE2	82.84	82.84	3
LINE4	1.83	3.81	0

%Average time/trans=average time/trans excluding zero entries

Contents of savevalues <non-zero>	
Savevalue name	Value
A	6200.00
B	7000.00
C	2500.00
D	5.00

Savevalues with zero value  
E

Приведен исходный вариант реализации. Загрузка приборов:  $M_1 = 0.99$ ;  $M_2 = 0.91$ ;  $M_3 = 0.61$ . Среднее время обслуживания:  $M_1 = 13.24$ ;  $M_2 = 25.01$ ;  $M_3 = 11.62$ . Количество обслуженных клиентов:  $M_1 = 36$ ;  $M_2 = 29$ ;  $M_3 = 25$ . Максимальные очереди:  $L_1 = 4$ ;  $L_2 = 4$ ;  $L_3 = 4$ ,  $L_4 = 1$ . Не обслуженные клиенты  $D(\text{Out1}) = 5$ ,  $E(\text{Out2}) = 0$ . Выручка:  $M_1(A) = 6200$ ;  $M_2(B) = 7000$ ;  $M_3(C) = 2500$ .

## ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И ОПТИМИЗАЦИЯ

На сегодняшний день большое число задач оптимизации сложных систем из различных областей науки и техники не могут быть решены с помощью аналитического

моделирования. Во многих случаях единственным методом решения является метод имитационного моделирования.

*Задача оптимизации на основе имитационного моделирования формулируется следующим образом: необходимо найти значения входных переменных (факторов), оптимизирующих основной выходной показатель системы (отклик). При этом предполагается, что функция отклика не может быть вычислена аналитически, но может быть рассчитана с помощью проведения имитационного эксперимента с моделью сложной системы.*

Оптимизация на основе имитационного моделирования заключается в совместном использовании имитационной модели (ИМ) сложной системы и алгоритма оптимизации. С помощью ИМ рассчитываются значения отклика для различных комбинаций значений факторов, которые предлагает алгоритм оптимизации. Поисковый алгоритм оптимизации, в свою очередь, используя значения отклика, пытается улучшить решение. Важными свойствами, которыми должны обладать системы оптимизации на основе имитационного моделирования, являются: качество получаемых решений (хотя его трудно определить на практике, поскольку истинный оптимум неизвестен) и время поиска, необходимое для их получения.

Применение в качестве алгоритма оптимизации точных математических методов оптимизации, обеспечивающих нахождение оптимального решения, не всегда целесообразно, поскольку имитационная модель является копией реальной системы с некоторой степенью точности. При этом использование точных методов, как правило, требует значительных вычислительных затрат, что во многих случаях является критичным или вовсе недопустимым. Поэтому, в большинстве случаев в качестве алгоритма поисковой оптимизации лучше использовать методы, которые не обязательно гарантируют достижение точного оптимума, а находят близкие к оптимальным решения и при этом обеспечивают быструю поисковую сходимость алгоритма.

На сегодняшний день существует несколько программных пакетов оптимизации имитационного моделирования, которые используют средства имитационного моделирования совместно с различными методами поиска решений: AutoStat AutoSimulations (Inc AutoMod), программы: AutoSched, процедуры поиска: эволюционные стратегии; OptQuest Optimization (Technologies, Inc.), программы: Arena, Micro Saint, QUEST процедуры поиска: поиск с рассеиванием, поиск с запрещением, нейронные сети; OPTIMIZ (Visual Thinking International Ltd.), программы: SIMUL8, процедуры поиска: эволюционные стратегии, нейронные сети; SimRunner2 (PROMODEL Corp.), программы: MedModel, ProModel, ServiceModel процедуры поиска: эволюционные стратегии, генетические алгоритмы; WITNESS Optimizer (Lanner Group, Inc.), программы: WITNESS, процедуры поиска: имитация отжига, поиск с запрещением.

В большинстве пакетов оптимизации в качестве процедур поиска решений используются эволюционные стратегии и генетические алгоритмы (ГА). Эти методы хорошо себя зарекомендовали как универсальные алгоритмы глобального поиска, которые позволяют находить квазиоптимальные решения за приемлемое время.

Наиболее применимым на практике способом решения данной проблемы является использование метамоделей. Метамоделю принято называть приближенную математическую модель, полученную в результате экспериментов с имитационной моделью с целью замещения последней при оптимизации.

*Основными методами построения метамоделей являются регрессионные модели и искусственные нейронные сети (НС), к которым в последнее время проявляется большой интерес, благодаря их мощной аппроксимирующей способности.*

Существуют различные схемы реализации поиска решения с помощью эволюционных вычислений и нейросетевых метамоделей, например, схема на основе контроля особей и схема на основе контроля поколений. **В первом случае** задается число контролируемых особей, для которых на каждом поколении работы алгоритма осуществ-

ляется расчет функции пригодности (ФП) с помощью прогона ИМ. Для остальных особей в популяции расчет ФП реализуется с использованием метамоделей. **Во втором случае** задается число контролируемых поколений, для которых реализуется расчет ФП всех особей популяции с использованием ИМ. Для неконтролируемых поколений расчет ФП осуществляется с помощью метамоделей.

На сегодняшний день не существует общей стратегии по выбору данных параметров при оптимизации конкретных систем. Также следует подчеркнуть, что для организации эффективного поиска решения и корректной сходимости оптимизационного алгоритма должна иметь возможность подстройки параметров системы оптимизации в процессе поиска решения. С этой целью предлагается использовать экспертную систему (ЭС). Среди современных программных комплексов имитационного моделирования можно выделить следующие распространенные пакеты: «Process Charter» (разработчик - фирма «Scitor», США); «Powersim» (фирма «Modell Data», Норвегия); «Ithink» (фирма «High Performance Systems», США); «Extend+BPR» (фирма «Imagine That!», США); «ReThink» (фирма «Gensym», США); «Pilgrim» (фирма «МегаТрон», Россия).

#### **ПОСТРОЕНИЕ МЕТАМОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ**

Метамоделей являются регрессионными моделями, представляющие собой оценку функции реакции системы на изменение значений факторов. С построением регрессионных моделей связано планирование машинных экспериментов с моделями систем.

**Планирование эксперимента представляет процедуру выбора числа и условий проведения испытаний, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.** Для этого составляется план проведения экспериментов с моделью системы с указанием комбинаций переменных и параметров системы. При этом под планом эксперимента понимают значения переменных, задаваемых в эксперименте.

**Задачами планирования машинного эксперимента являются:** уменьшение затрат машинного времени на моделирование; увеличение точности и достоверности результатов моделирования; проверка адекватности модели.

Эффективность машинного эксперимента зависит от выбора плана эксперимента, который определяет: объем и порядок проведения вычислений, накопление и статистическую обработку результатов.

Таким образом, при моделировании надо не только рационально построить модель системы, но и рационально (оптимально) спланировать использование этой модели для получения необходимой информации.

Проведение планирования машинных экспериментов призвано дать возможность получить максимальный объем необходимой информации об объекте моделирования при минимальном числе экспериментов.

Рассмотрим основные понятия теории планирования эксперимента. Наиболее подходящей моделью является черный ящик. Различают входные и выходные переменные:  $x_1, x_2, \dots, x_k$ ;  $y_1, y_2, \dots, y_n$  – факторы (экзогенные переменные) и реакция (эндогенные переменные). Каждый фактор  $x_i$  может принимать одно или несколько значений – уровней. Фиксированный набор уровней факторов определяет одно из возможных состояний системы.

Каждому фиксированному набору уровней факторов соответствует определенная точка в многомерном факторном пространстве.

Существует определенная связь между уровнями факторов и реакцией (откликом) системы:  $y_i = \psi_i(x_1, x_2, \dots, x_k)$  – функция реакции системы. Вид зависимости  $\psi_i$  заранее неизвестен, поэтому используют приближенное соотношение:  $\eta_i = \varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_k)$ . Зависимость  $\varphi_i$  находят по данным эксперимента.

Для оценки характеристик процесса функционирования системы (функции реакции системы) необходимо выявить влияние факторов на характеристики системы. Для этого необходимо отобрать факторы и описать функциональную зависимость, установить диапазон изменения факторов, определить область факторного пространства, в которой проводится эксперимент, оценить необходимое число реализаций.

Наибольшее применение нашли модели в виде алгебраических полиномов. Функцию реакции  $\psi_i(x_1, x_2, \dots, x_k)$  можно с некоторой степенью точности представить в виде полинома  $\eta = b_0 + \sum b_i x_i$ . Для оценки коэффициентов используется регрессионный анализ.

Если выбран вид функции  $\eta$ , то необходимо спланировать и провести эксперимент для оценки числовых значений коэффициентов.

План эксперимента D:

$$D = \begin{vmatrix} X_{11} & X_{21} & \dots & X_{k1} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{kn} \end{vmatrix} \quad Y = \begin{vmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_N \end{vmatrix}$$

где  $x_{iu}$  – значения, которые принимает  $i$  – переменная в  $u$  испытании.

Для линейной модели выбор локальной области факторного пространства G определяется границами области определения факторов  $x_{imin}$  и  $x_{imax}$  относительно основного нулевого уровня  $x_{i0}$  и интервал варьирования  $\Delta x_i$ .

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

Для линейной модели – два уровня факторов  $x_{in}$  и  $x_{iv}$ , т.е.  $q=2$ . Количество факторов –  $k$ . Такие планы называются планами типа  $2^k$ . Число всех возможных испытаний  $N=2^k$ .

Начальный этап планирования основан на варьировании факторов на двух уровнях:  $x_{in}$  и  $x_{iv}$  относительно  $x_{i0}$ . Каждый фактор принимает два значения  $x_{in} = x_{i0} - \Delta x_i$ ,  $x_{iv} = x_{i0} + \Delta x_i$ .

Для стандартизации и упрощения записи масштабы выбираются так, чтобы нижний уровень соответствовал -1, верхний +1, а основной 0. Это достигается с помощью выражения  $*x_i = (x_i - x_{i0}) / \Delta x_i$ , где  $*x_i$  – кодированное значение  $i$  фактора,  $\Delta x_i = (x_{iv} - x_{in}) / 2$ .

Пример плана типа  $N=2^2$ :

Номер испытания:		1	2	3	4
Факторы:	* $x_1$	-1	+1	-1	+1
	* $x_2$	-1	-1	+1	+1

**Пример.** Рассмотрим планирование эксперимента и построение функции реакции системы для примера парикмахерской. В качестве факторов выберем два параметра - время обслуживания клиентов первого и второго типа мастерами M2 и M3. Факторное пространство определяется нормативами по стрижке в пределах  $(10 \pm 5 - 20 \pm 5)$  минут и бритью –  $(7 \pm 5 - 17 \pm 5)$  минут. В качестве отклика выберем количество не обслуженных клиентов по причине большой очереди.

Будем считать, что модель линейна и, следовательно, включает два уровня факторов, т.е. реализуется план типа  $2^k$ , где  $k$  - число факторов.

Факторы: X - время обслуживания мастером M<sub>2</sub> клиентов первого типа, Y - время обслуживания мастером M<sub>3</sub> клиентов второго типа.

Отклик системы: Z – количество клиентов, покинувших парикмахерскую.

План проведения эксперимента и его результаты:

Номер испытания	X	Y	Z
1	20	17	53
2	20	7	17
3	10	17	38
4	10	7	2

Результаты моделирования в четырех испытаниях на GPSS:

```

Facility          Average      Number      Average
M1                utilization  entries     time/trans
M2                .999        3033        12.88
M3                .993        3033        12.88
Queue             Maximum     Average     Total       Zero       Percent
<M2 set>         contents   contents   entries    entries    zeros
LINE1            4          3.68       3033       1          4.55
LINE2            4          3.95       3033       0          3.85
LINE3            4          3.97       3033       1          3.93
Queue             Average     %Average    Current
<M2 set>         time/trans time/trans contents
LINE1            80.34     84.17      443
LINE2            85.62     89.48      443
LINE3            85.16     89.12      443
%Average time/trans-average time/trans excluding zero entries

Contents of savevalues (non-zero)
Savevalue name      Value
A                   6300.00
B                   6500.00
C                   6600.00
D                   38.00
E                   38.00
Do you want to continue: Y or N
  
```

1 испытание

Facility	Average utilization	Number entries	Average time/trans
M1	.99	37	12.88
M2	.93	23	19.46
M3	.93	64	6.98

Queue (AD set)	Maximum contents	Average contents	Total entries	Zero entries	Percent zeros
LINE1	4	3.68	22	1	4.55
LINE3	4	58.38	37	0	-0.00
LINE2	4	3.79	23	0	-0.00
LINE4	4	1.87	64	2	2.99

Queue (AD set)	Average time/trans	Average time/trans	Current contents
LINE1	80.34	84.17	3
LINE3	56.04	58.38	4
LINE2	82.62	82.62	4
LINE4	13.37	13.78	3

\$Average time/trans=average time/trans excluding zero entries

Contents of savevalues (non-zero)

Savevalue name	Value
A	6300.00
B	5000.00
C	6300.00
D	15.00
E	2.00

## 2 испытание

Facility	Average utilization	Number entries	Average time/trans
M1	.99	37	12.88
M2	.85	41	7.99
M3	.93	27	16.59

Queue (AD set)	Maximum contents	Average contents	Total entries	Zero entries	Percent zeros
LINE1	4	3.68	22	1	4.55
LINE3	3	1.52	41	10	24.39
LINE2	4	3.79	23	0	-0.00
LINE4	4	3.37	31	1	3.23

Queue (AD set)	Average time/trans	Average time/trans	Current contents
LINE1	80.34	84.17	3
LINE3	56.04	57.99	0
LINE2	82.62	82.62	4
LINE4	52.18	53.92	4

\$Average time/trans=average time/trans excluding zero entries

Contents of savevalues (non-zero)

Savevalue name	Value
A	6300.00
B	10000.00
C	2600.00
E	38.00

Savevalues with zero value  
D

## 3 испытание

Facility	Average utilization	Number entries	Average time/trans
M1	.99	37	12.88
M2	.85	41	7.99
M3	.93	64	6.98

Queue (AD set)	Maximum contents	Average contents	Total entries	Zero entries	Percent zeros
LINE1	4	3.68	22	1	4.55
LINE3	3	1.52	41	10	24.39
LINE2	4	3.79	23	0	-0.00
LINE4	4	1.87	64	2	2.99

Queue (AD set)	Average time/trans	Average time/trans	Current contents
LINE1	80.34	84.17	3
LINE3	56.04	57.99	0
LINE2	82.62	82.62	4
LINE4	13.37	13.78	3

\$Average time/trans=average time/trans excluding zero entries

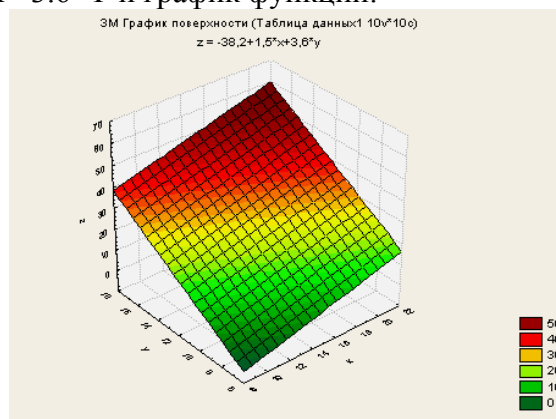
Contents of savevalues (non-zero)

Savevalue name	Value
A	6300.00
B	10000.00
C	6300.00
E	2.00

Savevalues with zero value  
D

## 4 испытание

С помощью регрессионного анализа пакета Statistica получаем функцию реакции системы  $Z = -38.2 + 1.5 \cdot X + 3.6 \cdot Y$  и график функции:



Проверим адекватность полученной модели. Подставим значение факторов и сверим результат с данными, полученными в результате моделирования на GPSS. Для проверки возьмём первый эксперимент:  $X=20, Y=17, Z = -38.2 + 1.5 \cdot X + 3.6 \cdot Y = 53$ . Количество клиентов, покинувших парикмахерскую, равно 53, как при испытании модели.



**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ**

**Критерий – минимальное число не обслуженных клиентов (факторы  $t_{M2}$  и  $t_{M3}$ )**

Итак, метамодель, функция реакции системы:  $Z = -38.2 + 1.5 \cdot X + 3.6 \cdot Y$ . Минимизация заключается в нахождении для данной задачи минимального значения целевой функции  $\min Z = -38.2 + 1.5 \cdot X + 3.6 \cdot Y$  – числа клиентов, покинувших парикмахерскую.

Для оптимизации целевой функции используются градиентные методы оптимизации. В данном случае, очевидно, что минимальное значение функция  $Z$  будет иметь при минимальных значениях аргументов  $X$  и  $Y$ . Подставим значения  $X, Y$  и получим:

$$\min Z = -38.2 + 1.5 \cdot X + 3.6 \cdot Y = -38.2 + 1.5 \cdot 10 + 3.6 \cdot 7 = 2.$$

Можно сделать вывод о том, что при уменьшении количества не обслуженных клиентов общая выручка за день увеличивается. Модель с параметрами четвертого испытания является одним из оптимальных вариантов. Действительно: приборы загружены полностью, очереди соответствуют требованиям, выручка составляет 22600 р.

**Критерий – максимальное количество обслуженных клиентов по четырем факторам  $t_{M1}$  - поток 1,  $t_{M1}$  – поток 2,  $t_{M2}$  и  $t_{M3}$**

Факторы:  $X_1$  – время обслуживания мастером  $M_1$  клиентов первого типа,  $X_2$  – время обслуживания мастером  $M_2$  клиентов первого типа,  $X_3$  – время обслуживания мастером  $M_1$  клиентов второго типа,  $X_4$  – время обслуживания мастером  $M_3$  клиентов второго типа.

Отклик системы:  $Z$  – количество обслуженных клиентов.

Так как количество факторов равно 4, а факторы имеют 2 уровня, то реализуется факторный эксперимент типа  $N = 2^4 = 16$ , т.е. для проведения полного факторного эксперимента необходимо провести 16 испытаний. Можно обойтись меньшим числом испытаний. Матрица планирования для 8 испытаний:

Номер испытания	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	-	-	-	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	+	+	-	-
5	-	-	+	+
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	+

В соответствии с планом ПФЭ проводят эксперимент с воспроизведением для каждой точки плана требуемых сочетаний уровней факторов и повторением нескольких опытов в каждой точке плана в случайной последовательности. Рандомизация плана эксперимента необходима для сведения эффектов не известных, не учитываемых факторов, которые могут изменяться случайным образом за время эксперимента, к случайным погрешностям. Перемешанный план проведения эксперимента и результаты анализа:

1	2	3	4	5
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$z$
10	10	7	7	146
20	20	7	17	98
20	10	17	7	133
10	20	17	7	123
20	20	17	17	75
10	10	7	17	105
20	20	7	7	122
10	10	17	17	99

Итоги регрессии для зависимой переменной: z (Таб1)						
R= ,98141953 R2= ,96318429 Скорректир. R2= ,91409667						
F(4,3)=19,622 p<,01727 Станд. ошибка оценки: 6,6448						
N=8	БЕТА	Стд. Ош. БЕТА	В	Стд. Ош. В	t(3)	p-уров.
Св.член			196,5250	11,63307	16,89365	0,000452
$x_1$	-0,098238	0,127916	-0,4167	0,54254	-0,76799	0,498408
$x_2$	-0,334010	0,127916	-1,4167	0,54254	-2,61116	0,079605
$x_3$	-0,241666	0,110779	-1,0250	0,46986	-2,18152	0,117182
$x_4$	-0,866462	0,110779	-3,6750	0,46986	-7,82156	0,004351

Функция отклика  $Z = 196.525 - 0.4167 \cdot X_1 - 1.4167 \cdot X_2 - 1.025 \cdot X_3 - 3.675 \cdot X_4$ .

Функция цели  $\max Z = 196.525 - 0.4167 \cdot X_1 - 1.4167 \cdot X_2 - 1.025 \cdot X_3 - 3.675 \cdot X_4$  будет иметь максимальное значение при наименьших значениях переменных  $X_1, X_2, X_3, X_4$ ,  $\max Z = 146$ . Выходные данные для  $X_1=10, X_2=10, X_3=7, X_4=7$ :

Facility	Average utilization	Number entries	Average time/trans
M1	.99	57	8.36
M2	.54	26	10.00
M3	.91	63	6.93

Queue (RD set)	Maximum contents	Average contents	Total entries	Zero entries	Percent zeros
LINE1	4	3.49	32	1	3.13
LINE3	1	.04	26	18	69.23
LINE2	4	3.74	33	0	.00
LINE4	2	.67	64	7	10.94

Queue (RD set)	Average time/trans	Average time/trans	Current contents
LINE1	52.36	54.05	4
LINE3	.69	2.25	0
LINE2	54.46	54.46	4
LINE4	5.04	5.66	1

\$Average time/trans=average time/trans excluding zero entries

Contents of savevalues (non-zero)

Savevalue name	Value
A	9650.00
B	6500.00
C	6200.00

Savevalues with zero value

D	
E	

При увеличении числа факторов увеличивается и погрешность решения в связи с предположением линейности системы. Это заметно по загрузке второго мастера M2.

Общая выручка составляет 22350 р. Это меньше, чем в предыдущем оптимальном варианте на 250 р. Выручка мастера  $M_1$  – 9650 р., он загружен полностью, обслужено клиентов - 57. Выручка мастера  $M_2$  – 6500 р. (ранее – 10000 р.), он загружен на 0.54, текущее значение очереди – 0, максимальное -1, обслужено клиентов - 26. Выручка мастера  $M_3$  – 6200 р., он загружен полностью, обслужено клиентов - 63. Количество клиентов, покинувших парикмахерскую – 0.

Анализ показывает, что существуют и другие варианты распределения загрузки мастеров.

#### СТАЦИОНАРНОСТЬ И НОРМАТИВЫ ПОТОКОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Важными характеристиками системы оптимизации на основе имитационного моделирования являются: нормативы обслуживания заявок и стационарность получаемых оптимальных решений.

##### *Нормативы обслуживания*

Для каждой операции обслуживания заявок разрабатываются определенные нормативы времени обслуживания  $t_{\min} - t_i - t_{\max}$ . Время обслуживания в заданных нормативах определяет квалификацию мастера. Чем меньше  $t_i$  – время, затрачиваемое мастером на обслуживание, тем выше квалификация мастера, выше его оплата.

**Пример.** Токарь 6 разряда тратит на изготовление детали, которая имеет определенный норматив времени изготовления, меньше времени, чем токарь 3 разряда. Система обработки информации нового поколения тратит меньше времени на обработку определенного объема информации, чем система предыдущего поколения.

Внесение времени обслуживания в приборах СМО в соответствии с нормативами позволяет осуществить оптимизацию с заданными ограничениями.

##### *Стационарность потоков*

**Поток событий называется стационарным, если его вероятностные характеристики не зависят от времени.**

Характеристика стационарности потоков обслуживания предполагает, что оптимальный режим обслуживания должен сохраняться на протяжении всего рабочего времени. Это достигается равенством средних значений времени поступлений заявок в систему и времени обслуживания заявок в системе  $T_w = T_k$  ( $T_w$  - интервал времени между поступлением транзактов в прибор,  $T_k$  – время обслуживания) (рисунок 17).

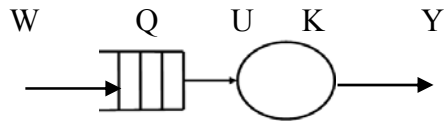


Рисунок 17 – Обслуживание заявок

Если увеличить время обслуживания  $T_k$  при постоянном входном потоке, то очередь с течением времени будет возрастать и наоборот. Из этого следует, что количество параллельных приборов Кол для обслуживания одного потока будет определяться выражением:

$$\text{Кол} = T_k / T_w .$$

Для примера парикмахерской среднее время поступления заявок в систему  $T_w = 8+5=13$ , а среднее время обслуживания  $T_k = 15+12=27$ . Следовательно, для обслуживания всех заявок, поступающих в систему, необходимо  $\text{Кол} = 27/13 \approx 2$  прибора.

Общий вывод: на основании анализа нормативов и стационарности потоков обслуживания происходит подбор количества мастеров и их квалификации.

### МОДЕЛЬ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СМО БЕЗ ОТКАЗОВ НА GPSS

Преобразуем приведенную модель СМО парикмахерской в модель без отказов. Это означает, что все заявки, пришедшие в систему, должны быть обслужены. Для этого необходимо удалить в GPSS-программе Out 1 – уход клиентов ввиду большой очереди на стрижку и Out 2– уход клиентов ввиду большой очереди на бритье. Выходные данные с временем обслуживания по первому потоку 15,5, по второму – 12,5:

```

Facility      Average      Number      Average
M1            utilization  entries     time/trans
M2            -93         30         14.92
M3            -93         38         11.79

Queue
(QDP set)    Maximum      Average      Total      Zero      Percent
              contents   contents   entries   entries   zeros
LINE1        4             3.71       22         1         4.55
LINE3        13            6.57       42         1         2.38
LINE2        4             3.79       22         0         0.00
LINE4        34            15.78      71         1         1.41

Queue
(QDP set)    Average      $Average      Current
              time/trans  time/trans   contents
LINE1        81.00       84.86        3
LINE3        75.04       76.87        12
LINE2        82.57       82.57        4
LINE4        106.70      108.22       33
$Average time/trans=average time/trans excluding zero entries

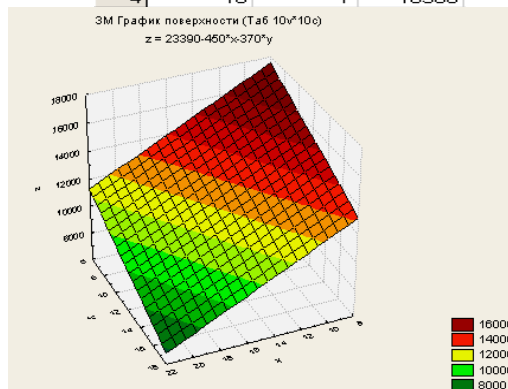
Contents of savevalues (non-zero)
Savevalue name      Value
A                    6300.00
B                    7250.00
C                    3700.00
Do you want to continue: Y or N
  
```

Загрузка приборов:  $M_1 - 0.99$ ;  $M_2 - 0.93$ ;  $M_3 - 0.93$ . Среднее время обслуживания:  $M_1 - 12.88$ ;  $M_2 - 14.92$ ;  $M_3 - 11.79$ . Количество обслуженных клиентов:  $M_1 - 37$ ;  $M_2 - 30$ ;  $M_3 - 38$ . Очереди:  $L_1 - 4$ ;  $M_2 - 4$ ;  $L_3 - 13$ ;  $L_4 - 34$ . Выручка:  $M_1 - 6300$ ;  $M_2 - 7250$ ;  $M_3 - 3700$ . Вариант неприемлем ввиду больших очередей на обслуживание.

Построим мета-модель. В качестве факторов будут: X - время обслуживания мастером  $M_2$  клиентов первого типа, Y - время обслуживания мастером  $M_3$  клиентов второго типа. Отклик системы: Z – выручка второго и третьего мастера.

План проведения эксперимента и его результаты:

	1 X	2 Y	3 Z
1	20	17	8100
2	20	7	11800
3	10	17	12600
4	10	7	16300



При уменьшении значений факторов X и Y значение целевой функции увеличивается. Функция цели при X=10 и Y=7:  $\max Z = 23390 - 450 \cdot X - 370 \cdot Y = 16300$ .

Оптимальный вариант модели без отказов:

Facility	Average utilization	Number entries	Average time/trans
M1	.99	37	12.88
M2	.85	41	9.99
M3	.93	64	6.98

Queue <AD set>	Maximum contents	Average contents	Total entries	Zero entries	Percent zeros
LINE1	4	3.68	22	1	4.55
LINE3	3	.52	41	10	24.39
LINE2	4	3.79	22	0	.00
LINE4	6	2.04	69	2	2.90

Queue <AD set>	Average time/trans	\$Average time/trans	Current contents
LINE1	80.34	84.17	3
LINE3	6.04	7.99	0
LINE2	82.52	82.62	4
LINE4	14.20	14.62	5

\$Average time/trans=average time/trans excluding zero entries

Savevalue name	Value
A	6300.00
B	10000.00
C	6300.00

Данный вариант совпадает с вариантом системы с отказами при минимальных значениях параметров X и Y, когда число отказов близко к нулю.

### СЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ

Самым распространенным формализмом, описывающим структуру и взаимодействие параллельных систем и процессов, являются сети Петри. Одно из основных достоинств сетей Петри заключается в том, что они реализуют причинно-следственные связи. Причинно-следственные связи открывает большие возможности для наглядного описания структурных особенностей функционирования реальных систем.

Сеть Петри определяется в виде  $N = (P, T, I, O, F, M)$ , где P – непустое конечное множество позиций сети, называемых местами или условиями; T – непустое конечное множество переходов или событий; I – прямая функция инцидентности,  $I(t, p)$  – кратность дуги из позиции в переход, O – обратная функция инцидентности,  $O(t, p)$  – кратность дуги из перехода в позицию, функция инцидентности  $F - F \subseteq P \times T \cup T \times P$  – отношение инцидентности позиций и переходов (множество дуг сети).

Разметка сети N – это функция  $M: P \rightarrow \mathbb{N}$ , которая ставит в соответствие каждой позиции p целое неотрицательное число  $M(p)$ . Если все места сети N строго упорядочены, т.е.  $P = (p_1, \dots, p_n)$ , то разметка  $M(p)$  сети задается как вектор чисел  $M(p) = (m_1, \dots, m_n)$ , такой, что для любого i  $m_i = M(p_i)$ . Для сети Петри, представленной на рисунке 18, начальная разметка  $M_0$  задается следующим образом:  $M_0(p_1) = 1, M_0(p_2) = 2, M_0(p_3) = 0$  или  $M_0 = (1, 2, 0)$ . При разметке  $M_0$  может сработать переход  $t_1$  или  $t_2$ . Переходы  $t_3$  и  $t_4$  не могут сработать, т.к. для этого нет достаточных условий. В результате срабатывания перехода  $t_1$  разметка  $M_0$  сменяется на разметку (1, 3, 0), а в результате срабатывания перехода  $t_2$  разметка  $M_0$  сменяется на разметку (0, 1, 1).

Если срабатывает переход  $t_2$ , то  $\delta((1, 2, 0), t_2) = (0, 1, 1)$ , далее, если срабатывает переход  $t_3$ , то  $\delta((0, 1, 1), t_3) = (0, 3, 0)$ , и функционирование сети прекращается, так как не может сработать ни один переход, тупик.

Разметка  $M \in R(N)$ , где  $R(N)$  – множество всех разметок, достижимых от начальной разметки, называется тупиковой, если в сети не существует ни одного перехода, который может сработать при этой разметке. Для рассматриваемой сети тупиковыми являются разметки (0, 2, 0), (0, 3, 0), ... (0, n, 0).

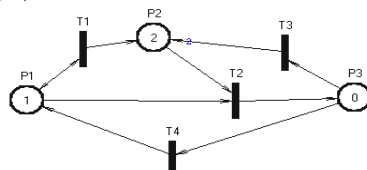


Рисунок 18 – Сеть Петри

Определенные сочетания условий позволяют реализоваться некоторому событию (предусловия события), а реализация события изменяет некоторые условия (постусловия события), т.е. события взаимодействует с условиями, а условия с событиями.

Сети Петри наряду с причинно-следственными связями могут реализовать и временные связи, т.е. они могут быть моделями управления процессами и потоковыми моделями. В качестве потоковой модели рассмотрим сеть Петри, реализующую станок по обработке деталей (рисунок 19).

Детали (фишки) для обработки накапливаются в накопителе  $p_1$ . Если станок свободен (свободен он тогда, когда в позиции  $p_2$  появляется фишка), то переход  $t_1$  срабатывает и пропускает деталь на обработку в место  $p_3$ .

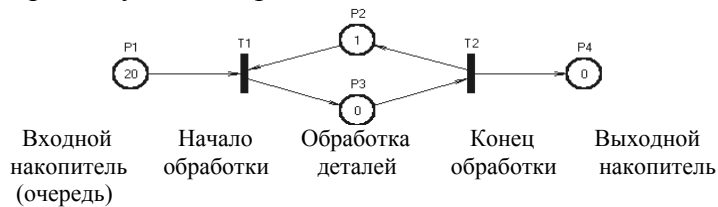


Рисунок 19 - Процесс функционирования станка

Обработка детали имитируется задержкой фишки в месте  $p_3$  на некоторый момент времени, представляющий собой непрерывную случайную величину – параметр обработки. По окончании обработки срабатывает переход  $t_2$  и деталь попадает в выходной накопитель  $p_4$ , а в место  $p_2$  поступает фишка, открывая доступ другой детали.

Вот так выглядит схема сетевой модели системы без отказов (парикмахерской) с помощью простой ординарной сети Петри (рисунок 20).

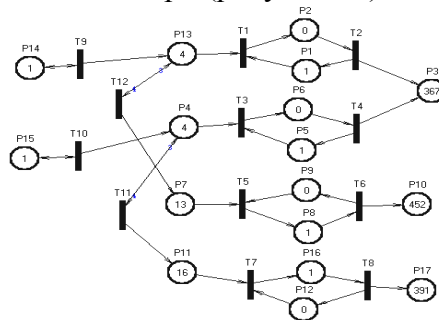


Рисунок 20 – Сетевая модель парикмахерской

Генераторы входных потоков ( $P_{14}, T_9$ ) – первого типа и ( $P_{15}, T_{10}$ ) – второго типа. Прибор  $M_1$  представлен двумя каналами обслуживания: первый – ( $P_{13}, T_1, P_1, P_2, T_2, P_3$ ), второй – ( $P_4, T_3, P_5, P_6, T_4, P_3$ ).  $P_{13}, P_4$  – очереди для двух входных потоков - Прибор  $M_2$  представлен одним каналом – ( $P_7, T_5, P_8, P_9, T_6, P_{10}$ ), прибор  $M_3$  – ( $P_{11}, T_7, P_{12}, P_{16}, T_8, P_{17}$ ).  $P_7, P_{11}$  – очереди к приборам  $M_2$  и  $M_3$ . Переходы  $T_{12}, T_{11}$  отслеживают длины очередей  $P_{13}, P_4$ . В данном случае длина очередей не превышает 4 фишек. На рисунке показан фрагмент процесса при заданных определенных характеристиках обслуживания.

Для моделирования сложных систем используются сети Петри с расширенными свойствами – цветные сети Петри.

## ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ

### МОДЕЛЬ РАБОТЫ ПОСТА ДПС

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На шоссе при въезде в город работает пост ДПС. На посту в течение дня работает 5 инспекторов. Рабочий день инспектора равен 10 часам. Режим работы – раз в трое суток. Затраты на одного инспектора равны 35000 рублей в месяц. Инспектор оформляет протокол в среднем за 12 минут. В течение часа скоростной режим нарушают в среднем 35 водителей. Инспекторы останавливают машину, если ожидают оформления не более четырех машин. Средний размер штрафа равен 250 рублям.



Определить параметры работы системы: найти процент оштрафованных нарушителей, среднее время ожидания оформления, среднюю очередь на оформление, среднюю сумму от штрафов за месяц, месячные затраты на пост ДПС, «прибыль» поста за месяц. Определить оптимальное (с точки зрения прибыли) число инспекторов на посту при сохранении остальных условий задачи.

#### ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

Данная задача относится к задачам СМО с ограниченной очередью. Максимальная длина очереди равна  $m=5$ . Интенсивность потока требований (в качестве которого выступает поток нарушителей) равна  $\lambda = 35$  водителей в час. Исходно имеется пять каналов обслуживания (пять инспекторов находятся на посту одновременно):  $n=5$ . Среднее время обслуживания одним каналом (среднее время, которое тратит инспектор на один автомобиль) равно  $\bar{t} = 12$ , тогда  $\mu = \frac{1}{\bar{t}} = \frac{1}{12}$  авт./мин =  $\frac{60}{12} = 5$  авт./час.

#### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

В соответствие с описанием многоканальной СМО с ожиданием (система с ограниченной длиной очереди) определяются параметры функционирования системы:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{35}{5} = 7,$$

$$\alpha = \frac{\rho}{n} = \frac{7}{5} = 1,4.$$

$$\rho \neq n \Rightarrow B = \frac{1,4}{1-1,4} \cdot (1-1,4^5) = 15,32384.$$

$$\rho_0 = \frac{1}{\left(1 + 7 + \frac{7^2}{2} + \frac{7^3}{6} + \frac{7^4}{24} + \frac{7^5}{120} + 15,32384 \cdot \frac{7^5}{120}\right)} = 0,0004.$$

$$\rho_{отк} = \frac{7^{10}}{120 \cdot 5^5} \cdot 0,0004 = 0,304228. \quad Q = 1 - 0,304228 = 0,695772.$$

$\lambda_{эфф} = 35 \cdot 0,695772 = 24,35203$  - в среднем 24,35 автомобилей будет оштрафовано в час.

$$\bar{k} = \frac{24,35}{5} = 4,870406 \text{ - почти все инспекторы (4,8 из 5) заняты (загрузка 0,974).}$$

$$\text{Средняя длина общей очереди: } D = \frac{1,4 \cdot (1 + (5 \cdot 1,4 - 5 - 1) \cdot 1,4^5)}{(1-1,4)^2} = 55,8096 \approx 56.$$

$$L_0 = \frac{7^5}{120} \cdot 56 \cdot 0,0004 = 3,137307 \approx 3 \text{ - в среднем ожидает оформления 3 машины.}$$

$$L_C = 3 + 4,870406 = 7,87 \text{ - всего в системе машин.}$$

$$\text{Время в очереди и системе: } W_0 = \frac{3}{24,35203} = 0,12 \text{ часа} = 7,2 \text{ мин.} \quad W_C = 7,2 + 12 = 19,2 \text{ мин.}$$

Таким образом, среднее время, которое тратит водитель в ожидании оформления протокола, равно 7,2 мин.

$$\text{Средняя сумма штрафов за месяц: } C_{штр} = 24,35 \cdot 250 \cdot 10 \cdot 30 = 1826402 \approx 1826 \text{ тыс.р.}$$

$$\text{Месячные затраты на пост ДПС: } F = 3 \cdot 5 \cdot f = 15 \cdot 35000 = 525000 \text{ руб.} = 525 \text{ тыс. р.}$$

«Прибыль» поста складывается из суммы штрафов («дохода») минус затраты на инспекторов («расхода»). Таким образом, месячная «прибыль» поста равна:

$$Z = C_{штр} - F = 1826 - 525 = 1301 \text{ тыс.р.}$$

Для определения оптимального числа инспекторов необходимо вычислить все интересные величины в пакете MS Excel (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры функционирования системы

$\rho =$	7								
$m =$	5								
$\lambda =$	35								
$\mu =$	5								
Штр	250								
n	$\alpha$	B	$\rho^n / m!$	$\rho_0$	$\rho_{отк}$	$\lambda_{эфф}$	$C_{штр}$	F	Z
1	7	19607	7	7,3E-06	0,857144	4,999964	374997,3	105000	269997,3
2	3,5	733,91	24,5	5,6E-05	0,714357	9,997502	749812,6	210000	539812,6
3	2,333333	119,29	57,17	0,00014	0,572287	14,96997	1122747	315000	807747,5
4	1,75	35,964	100	0,00026	0,433519	19,82685	1487014	420000	1067014
5	1,4	15,324	140,1	0,0004	0,304228	24,35203	1826402	525000	1301402
6	1,166667	8,1298	163,4	0,00055	0,193884	28,21408	2116056	630000	1486056
7	1	5	163,4	0,00068	0,110888	31,11893	2333920	735000	1598920
8	0,875	3,4096	143	0,00078	0,056979	33,00575	2475431	840000	1635431
9	0,777778	2,5038	111,2	0,00084	0,026616	34,06843	2555132	945000	1610132
10	0,7	1,9412	77,84	0,00088	0,011479	34,59822	2594867	1050000	1544867
11	0,636364	1,5674	49,54	0,0009	0,004633	34,83784	2612838	1155000	1457838
12	0,583333	1,3054	28,9	0,00091	0,001767	34,93817	2620362	1260000	1360362
13	0,538462	1,1139	15,56	0,00091	0,00064	34,97759	2623319	1365000	1258319
14	0,5	0,9688	7,78	0,00091	0,000221	34,99225	2624419	1470000	1154419
15	0,466667	0,8556	3,631	0,00091	7,32E-05	34,99744	2624808	1575000	1049808

В последнем столбце получено значение прибыли поста за месяц. График этой величины в зависимости от числа инспекторов приведен на рисунке 21.

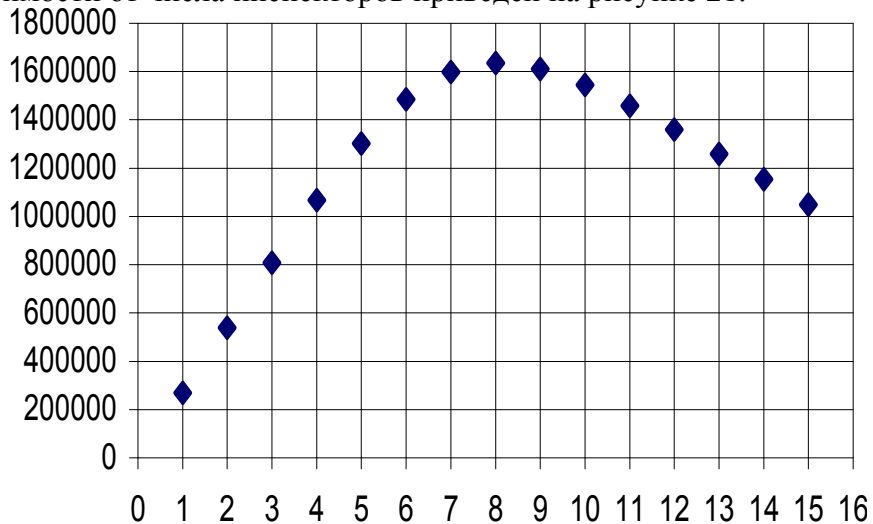


Рисунок 21 – Зависимость прибыли от числа инспекторов

Из графика и по значениям в таблице видно, что максимальная прибыль достигается при значении  $n=8$  и равна 1635431 р. в месяц.

Вывод: При прочих постоянных параметрах, выгоднее нанять 24 инспектора (по 8 инспекторов одновременно).

**МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ НА GPSS**

Для имитационного моделирования СМО поста ДПС используются система GPSS. Вводятся некоторые допущения. Так как инспектор оформляет протокол в среднем за 12 минут, то вместо пяти инспекторов рассматривается один с временем оформления протокола за  $12/5=2.4$  мин. Следовательно, задача сводится к одному прибору обслуживания с временем 2.4 мин. Далее, очередь к посту ДПС должна быть не более четырех машин. Нарушают режим в среднем 35 машин в час, или 0.6 машин/мин., следовательно, машины поступают на пост ДПС каждые 1.6 мин.

Модель такой системы представлена на рисунке 22.

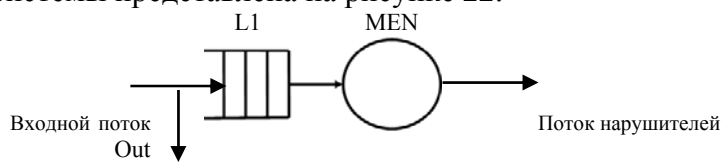


Рисунок 22 – Модель поста ДПС

Программа модели:

```

SIMULATE
GENERATE 1.6
IF Q$L1>4,OUT
QUEUE L1
SEIZE MEN
DEPART L1
ADVANCE 2.4
SAVEVALUE SUMMA+,250
RELEASE MEN
OUT TERMINATE
GENERATE 1
TERMINATE 1
START 60
END
    
```

Выходные данные за 1 час работы 5 инспекторов:

```

Facility      Average      Number      Average
  MEN          utilization  entries      time/tran
                .97             25             2.33

Queue
(AD set)      Maximum      Average      Total      Zero      Percent
                contents  contents  entries  entries  zeros

L1             5             3.42         29         1         3.45

Queue
(AD set)      Average      $Average      Current
                time/trans  time/trans  contents

L1             7.07         7.32         4
$Average time/trans=average time/trans excluding zero entries

Contents of savevalues (non-zero)
Savevalue name Value
SUMMA          6000.00
    
```

Загрузка инспекторов MEN – 0.97; оштрафовано машин – 25; среднее количество машин в очереди – 3.42; среднее количество машин в системе – 3.42+4=7.42; среднее время в очереди – 7.07; сумма штрафа – 6000 р.

### ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ

Для исследования модели составляется таблица испытаний за один день работы ДПС:

	1 Var1	2 Var2	3 Var3	4 Var4	5 Var5
1	2	6,00	24750	6999	17751
2	4	3,00	49750	13999	35751
3	6	2,00	74750	20998	53752
4	8	1,50	99750	27998	71752
5	10	1,20	99750	34998	64752
6	12	1,00	99750	41997	57753
7	14	0,86	99750	48997	50753

Данные, полученные на модели: *Var1* – количество инспекторов, *Var2* – время обслуживания машин, *Var3* – средняя сумма штрафов за день, *Var4* – средние затраты на пост ДПС за день, *Var5* – средняя прибыль за день.

График суммы штрафов за день, средних затрат на пост ДПС за день, средней прибыли за день в зависимости от количества инспекторов:

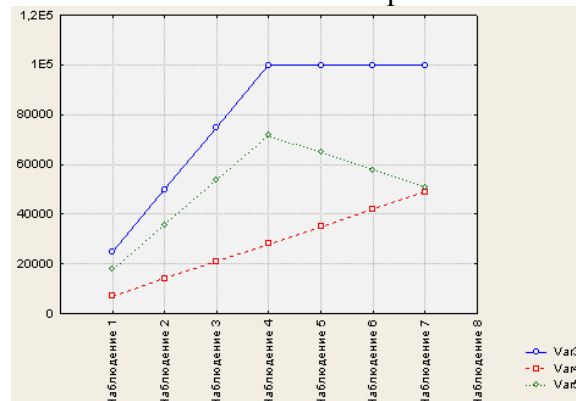
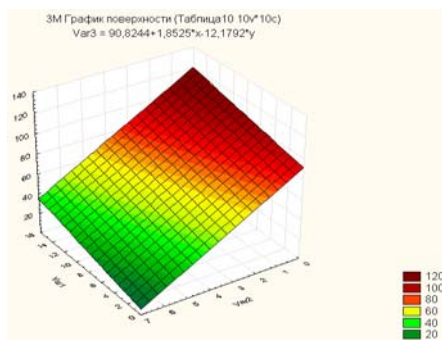
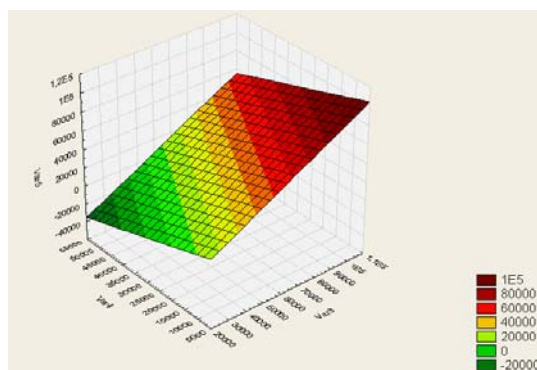


График поверхности зависимости суммы штрафов от количества инспекторов и времени обслуживания:



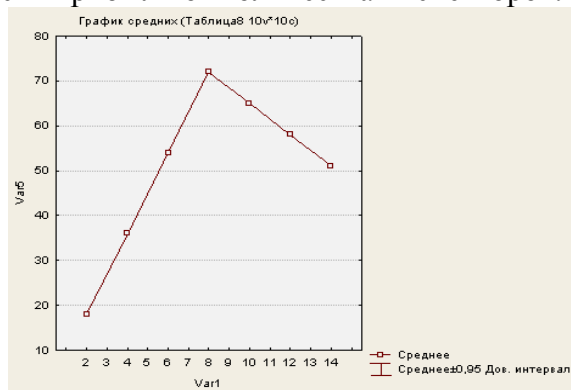
Наибольшее значение суммы штрафа достигается при максимальном количестве инспекторов и минимальном времени обслуживания.

График поверхности зависимости прибыли от средней суммы штрафа и средних затрат:



Наибольшее значение прибыли образуется при максимальной сумме штрафов и минимальной сумме затрат.

График зависимости прибыли от количества инспекторов:



Оптимальное количество инспекторов равно 8. Прибыль поста ДПС за один день при этом составляет 71752 р.

## МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается часть производственного процесса изготовления плат компьютера, а точнее решение частной задачи, связанной с оценкой эффективности контроля качества. На предприятии действует входной и выходной контроль качества. Структурная схема такого производства показана на рисунке 23.

Из трех изготавливающих цехов предприятия в сборочный цех с определенной интенсивностью поступают отдельные блоки платы. Перед сборкой блоки подвергаются входному контролю качества, который выявляет и устраняет дефекты по каждому комплектующему изделию отдельно. После проведения проверки качества происходит сборка плат за определенное время.

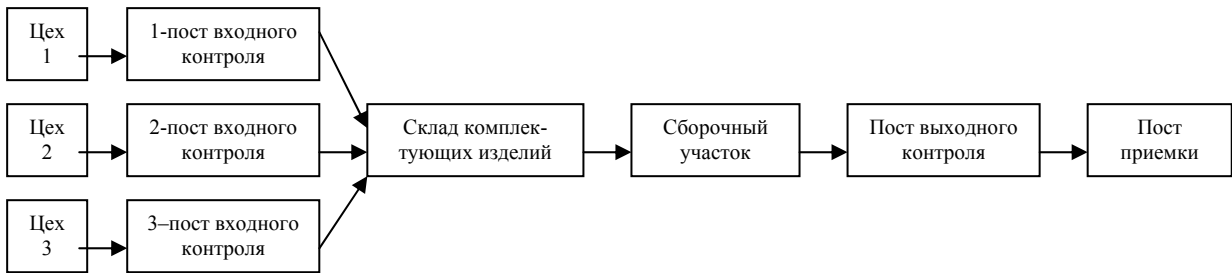


Рисунок 23 – Структурная схема производства

Далее готовые платы поступают на пост выходного контроля качества, где проверяются все параметры. Последним этапом контроля является проверка и тестирование готового изделия.

Каждый контрольный пост имеет свой накопитель (буфер), служащий для сглаживания неритмичности технологического процесса. Определение задержек, вносимых в работу постами контроля, производится путем введения функции штрафа. Штрафы налагаются на каждый пост контроля при переполнении его буфера. Вычисляется также общая функция штрафа  $Q$  за определенный интервал времени  $T$ .

В общем случае процесс наложения штрафа является случайным и определяется величиной  $q$ .

Пусть  $q_i^*$  величина, равная 1, если  $V(t) \geq L$ , где  $V(t)$  – текущее содержимое буфера контрольного устройства,  $L$  – его максимальная емкость. Тогда  $q_i^* = 1$  если  $V(t) \geq L_i$  иначе  $q_i^* = 0$  если  $V(t) < L_i$ .

Функция штрафа для  $i$ - поста при  $M$  блоках за время  $T$  равна  $q_i = \sum q_{ij}^*$ .

Общий штраф вычисляется по выражению  $Q = \sum q_i$ , где  $N$  – число постов контроля. Среднее значение функции штрафа по всем постам за время  $T$  равно  $Q = (1/N) \sum q_i$ .

При исследовании модели необходимо проанализировать изменение размеров штрафов от времени контроля и выяснить влияние операций контроля на технологический процесс изготовления плат.

#### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В соответствии с описанием производственного процесса изготовления плат компьютера и оценкой эффективности контроля качества структурная схема модели имеет вид (рисунок 24).

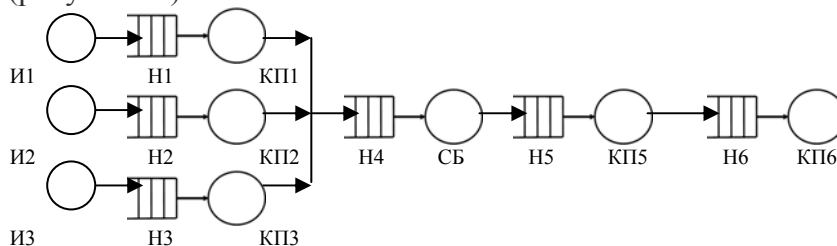


Рисунок 24 – Структурная схема модели

Источники И1, И2 и И3 соответствуют цехам, поставляющим блоки. Интервалы поступления блоков распределены по равномерному закону с интенсивностью  $(7 \pm 1)$  ед. времени. Приборы входного контроля КП1, КП2, КП3 осуществляют проверку входных блоков и устранение дефектов. Перед приборами расположены накопители Н1, Н2, Н3 с емкостью 6 единиц. При превышении этой емкости налагается штраф на соответствующий пост контроля. Далее производится сборка плат (Н4, СБ), а затем осуществляется проверка неисправностей готовой платы (Н5, КП5) и тестирование (Н6, КП6). Время сборки распределено по равномерному закону и равно  $(6 \pm 2)$  ед. времени.

#### ПРОГРАММА МОДЕЛИ

```
SIMULATE
NS1 STORAGE 6
NS2 STORAGE 6
NS3 STORAGE 6
NS4 STORAGE 6
```

; Накопители с емкостью 6 ед.



```

NS5 STORAGE 6
NS6 STORAGE 6
GIST TABLE X$COXR1,7,7,20
GENERATE 7,1 ;
SPLIT 2,BBB,5
BBB TEST E P5,2,CCC
TRANSFER ,BLOKA
CCC TEST E P5,3,DDD
TRANSFER ,BLOKB
DDD TEST L $$NS1,6,PAM1
SAVEVALUE COXR1+,1
TABULATE GIST
SAVEVALUE COXR2+,1
PAM1 ENTER NS1
SEIZE 1
LEAVE NS1
ADVANCE 19,3
RELEASE 1
TRANSFER ,SBOR
BLOKA TEST L $$NS2,6,PAM2
SAVEVALUE COXR1+,1
TABULATE GIST
SAVEVALUE COXR3+,1
PAM2 ENTER NS2
SEIZE 2
LEAVE NS2
ADVANCE 18,4
RELEASE 2
TRANSFER ,SBOR
BLOKB TEST L $$NS3,6,PAM3
SAVEVALUE COXR1+,1
TABULATE GIST
SAVEVALUE COXR4+,1
PAM3 ENTER NS3
SEIZE 3
LEAVE NS3
ADVANCE 19,3
RELEASE 3
TRANSFER ,SBOR
SBOR ASSEMBLE 3
ENTER NS4
SEIZE 4
LEAVE NS4
ADVANCE 6,2
RELEASE 4
TEST L $$NS5,6,PAM5
SAVEVALUE COXR1+,1
TABULATE GIST
SAVEVALUE COXR5+,1
PAM5 ENTER NS5
SEIZE 5
LEAVE NS5
ADVANCE 18,4
RELEASE 5
TEST L $$NS6,6,PAM6
SAVEVALUE COXR1+,1
TABULATE GIST
SAVEVALUE COXR6+,1
PAM6 ENTER NS6
SEIZE 6
LEAVE NS6
ADVANCE 19,4
RELEASE 6
TERMINATE
GENERATE 480 ; Системные часы на 480 ед. времени
TERMINATE 1
START 1
STOP
END

```

Программа использует один генератор **GENERATE 7,1** транзактов с последующим расщеплением потока на три потока с такими же характеристиками оператором **SPLIT**. Используются в программе накопители емкостью 6 единиц **STORAGE 6**. Накопленные данные сохраняются в таблице **GIST TABLE**.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ**

Параметрами исследования являются: время устранения дефектов приборами входного контроля КП1, КП2, КП3, время проверки неисправностей готовой платы прибором КП5 и время тестирования прибором КП6. Необходимо проследить реакцию системы на изменение этих параметров. При увеличении значений параметров (времени проверки и тестирования) до значений, равных 7 ед. времени наполнение накопителей практически не происходит, так как это определяется временем поступления транзактов входного потока 7,1 (стационарный поток). Выходные данные при значении параметров КП1, КП2, КП3, КП5, КП6 -7 ед.:

Facility	Average utilization	Number entries	Average time/trans
1	.98	68	6.93
2	.99	68	7.98
3	.98	68	6.93
4	.83	57	6.97
5	.95	65	7.00
6	.93	64	7.00

Storage	Capacity	Average contents	Average utilization	Entries	Average time/trans
NS1	6	.31	.05	68	2.19
NS2	6	.31	.05	68	2.19
NS3	6	.31	.05	68	2.19
NS4	6	.03	.00	62	1.19
NS5	6	.00	.00	66	1.98
NS6	6	.00	.00	64	.00

Storage	Current contents	Maximum contents
NS1	0	1
NS2	0	1
NS3	0	1
NS4	0	1
NS5	1	1
NS6	0	1

Начиная с 8 ед. времени накопление транзактов в накопителях и штрафов возрастает. Выходные данные для значений параметров (8, 7, 7, 7, 7):

Facility	Average utilization	Number entries	Average time/trans
1	.99	68	7.98
2	.99	68	6.97
3	.99	68	7.98
4	.74	59	5.99
5	.84	65	6.97
6	.83	59	6.96

Storage	Capacity	Average contents	Average utilization	Entries	Average time/trans
NS1	6	4.03	.67	66	29.34
NS2	6	.40	.07	69	2.81
NS3	6	.40	.07	69	2.81
NS4	6	.00	.00	59	.00
NS5	6	.03	.00	58	.23
NS6	6	.00	.00	57	.00

Storage	Current contents	Maximum contents
NS1	6	6
NS2	1	1
NS3	1	1
NS4	0	1
NS5	0	1
NS6	0	1

Table GIST	Mean argument	Standard deviation	Sum of arguments
Entries in table	23	12.00	6.78
			276.00

Range	Observed frequency	Per cent of total	Cumulative percentage	Cumulative remainder
4.01 -	4	13.04	13.04	86.96
8.01 -	12	17.39	30.43	69.57
12.01 -	4	17.39	47.83	52.17
16.01 -	20	17.39	65.22	34.78
20.01 -	24	17.39	82.61	17.39
24.01 -	4	17.39	100.00	.00

Remaining frequencies are all zero

Contents of savevalues (non-zero)	Value
SAVEVAL1	23.00
COXR	23.00
COXR1	23.00

Savevalues with zero value	
COXR2	
COXR3	
COXR4	
COXR5	

При увеличении значений параметров процесс накопления транзактов и штрафов возрастает. Выходные данные для значений параметров (10, 10, 10, 10, 10):

Facility	Average utilization	Number entries	Average time/trans
1	.99	48	9.87
2	.99	48	9.87
3	.99	48	9.87
4	.60	47	6.10
5	.95	46	9.91
6	.93	45	9.91

Storage	Capacity	Average contents	Average utilization	Entries	Average time/trans
NS1	6	5.07	.84	54	45.06
NS2	6	5.07	.84	54	45.06
NS3	6	5.07	.84	54	45.06
NS4	6	.00	.00	47	.00
NS5	6	.14	.02	46	1.43
NS6	6	.00	.00	45	.00

Storage	Current contents	Maximum contents
NS1	6	6
NS2	6	6
NS3	6	6
NS4	0	1
NS5	0	1
NS6	0	1

Table GIST	Mean argument	Standard deviation	Sum of argument
Entries in table	144	72.50	41.71
			10440.01

Range	Observed frequency	Per cent of total	Cumulative percentage	Cumulative remainder
4.01 -	4	.0028	2.008	97.992
8.01 -	12	.0084	4.016	95.144
12.01 -	16	.0112	5.136	92.368
16.01 -	20	.0140	6.256	89.640
20.01 -	24	.0168	7.376	86.960
24.01 -	28	.0196	8.496	84.304
28.01 -	32	.0224	9.616	81.648
32.01 -	36	.0252	10.736	79.000
36.01 -	40	.0280	11.856	76.352
40.01 -	44	.0308	12.976	73.704
44.01 -	48	.0336	14.096	71.056
48.01 -	52	.0364	15.216	68.408
52.01 -	56	.0392	16.336	65.760
56.01 -	60	.0420	17.456	63.112
60.01 -	64	.0448	18.576	60.464
64.01 -	68	.0476	19.696	57.816
68.01 -	72	.0504	20.816	55.168
72.01 -	76	.0532	21.936	52.520
76.01 -	80	.0560	23.056	49.872
80.01 -	84	.0588	24.176	47.224
84.01 -	88	.0616	25.296	44.576
88.01 -	92	.0644	26.416	41.928
92.01 -	96	.0672	27.536	39.280
96.01 -	100	.0700	28.656	36.632
100.01 -	104	.0728	29.776	33.984
104.01 -	108	.0756	30.896	31.336
108.01 -	112	.0784	32.016	28.688
112.01 -	116	.0812	33.136	26.040
116.01 -	120	.0840	34.256	23.392
120.01 -	124	.0868	35.376	20.744
124.01 -	128	.0896	36.496	18.096
128.01 -	132	.0924	37.616	15.448
132.01 -	136	.0952	38.736	12.800
136.01 -	140	.0980	39.856	10.152
140.01 -	144	.1008	40.976	7.504
144.01 -	148	.1036	42.096	4.856
148.01 -	152	.1064	43.216	2.208
152.01 -	156	.1092	44.336	.000
156.01 -	160	.1120	45.456	.000
160.01 -	164	.1148	46.576	.000
164.01 -	168	.1176	47.696	.000
168.01 -	172	.1204	48.816	.000
172.01 -	176	.1232	49.936	.000
176.01 -	180	.1260	51.056	.000
180.01 -	184	.1288	52.176	.000
184.01 -	188	.1316	53.296	.000
188.01 -	192	.1344	54.416	.000
192.01 -	196	.1372	55.536	.000
196.01 -	200	.1400	56.656	.000
200.01 -	204	.1428	57.776	.000
204.01 -	208	.1456	58.896	.000
208.01 -	212	.1484	60.016	.000
212.01 -	216	.1512	61.136	.000
216.01 -	220	.1540	62.256	.000
220.01 -	224	.1568	63.376	.000
224.01 -	228	.1596	64.496	.000
228.01 -	232	.1624	65.616	.000
232.01 -	236	.1652	66.736	.000
236.01 -	240	.1680	67.856	.000
240.01 -	244	.1708	68.976	.000
244.01 -	248	.1736	70.096	.000
248.01 -	252	.1764	71.216	.000
252.01 -	256	.1792	72.336	.000
256.01 -	260	.1820	73.456	.000
260.01 -	264	.1848	74.576	.000
264.01 -	268	.1876	75.696	.000
268.01 -	272	.1904	76.816	.000
272.01 -	276	.1932	77.936	.000
276.01 -	280	.1960	79.056	.000
280.01 -	284	.1988	80.176	.000
284.01 -	288	.2016	81.296	.000
288.01 -	292	.2044	82.416	.000
292.01 -	296	.2072	83.536	.000
296.01 -	300	.2100	84.656	.000
300.01 -	304	.2128	85.776	.000
304.01 -	308	.2156	86.896	.000
308.01 -	312	.2184	88.016	.000
312.01 -	316	.2212	89.136	.000
316.01 -	320	.2240	90.256	.000
320.01 -	324	.2268	91.376	.000
324.01 -	328	.2296	92.496	.000
328.01 -	332	.2324	93.616	.000
332.01 -	336	.2352	94.736	.000
336.01 -	340	.2380	95.856	.000
340.01 -	344	.2408	96.976	.000
344.01 -	348	.2436	98.096	.000
348.01 -	352	.2464	99.216	.000
352.01 -	356	.2492	100.336	.000
356.01 -	360	.2520	101.456	.000
360.01 -	364	.2548	102.576	.000
364.01 -	368	.2576	103.696	.000
368.01 -	372	.2604	104.816	.000
372.01 -	376	.2632	105.936	.000
376.01 -	380	.2660	107.056	.000
380.01 -	384	.2688	108.176	.000
384.01 -	388	.2716	109.296	.000
388.01 -	392	.2744	110.416	.000
392.01 -	396	.2772	111.536	.000
396.01 -	400	.2800	112.656	.000

Contents of savevalues (non-zero)	Value
SAVEVAL1	144.00
COXR	144.00
COXR1	144.00
COXR2	144.00
COXR3	144.00

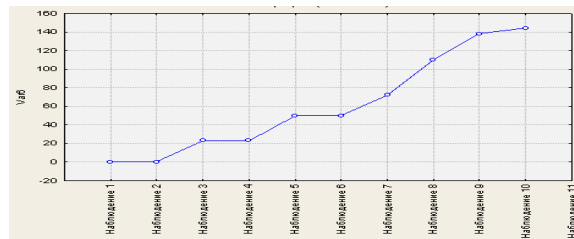
Savevalues with zero value	
COXR4	
COXR5	

Данные экспериментов в интервале времени обслуживания от 3 ед. до 10 ед. времени заносятся в таблицу:

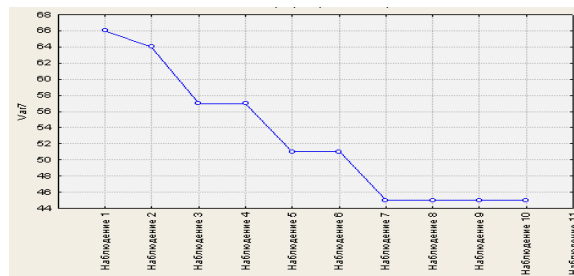
	1 Var1	2 Var2	3 Var3	4 Var4	5 Var5	6 Var6	7 Var7
1	3	3	3	3	3	0	66
2	7	7	7	7	7	0	64
3	7	7	8	7	7	7	23
4	7	7	8	8	8	23	57
5	7	8	8	9	9	9	50
6	7	8	9	9	10	50	51
7	8	8	9	10	10	72	45
8	8	9	10	10	10	110	45
9	9	10	10	10	10	138	45
10	10	10	10	10	10	144	45

где VAR1, VAR2, VAR3, VAR4, VAR5 - время проверки и тестирования на пунктах КП1, КП2, КП3, КП5, КП6; VAR6 – общая сумма штрафов; VAR7 - количество продукции на выходе последнего поста контроля.

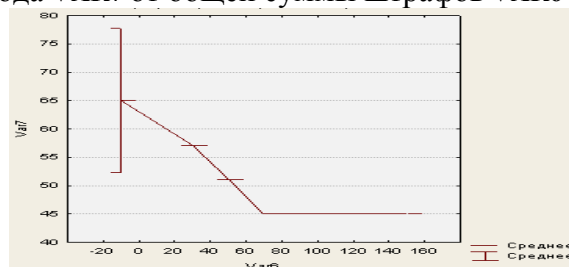
Анализ переменной VAR6 показывает, что общая сумма штрафов постоянно, почти линейно возрастает, начиная со второго наблюдения. Это показывает график переменной VAR6:



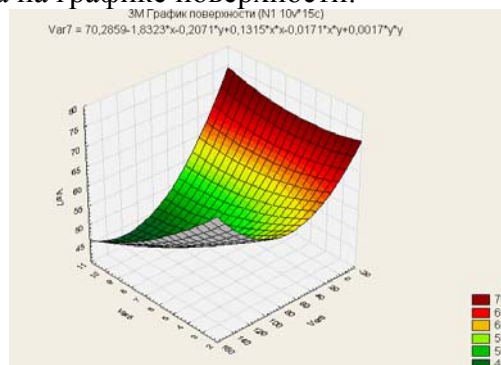
При анализе переменной VAR7 количество транзактов на выходе системы (выпускаемая продукция) в зависимости от увеличения времени обслуживания сокращается до заполнения накопителей (8 ед. времени), а затем становится постоянным (график переменной VAR7):



Зависимость выхода VAR7 от общей суммы штрафов VAR6 показана на графике:



Зависимость выхода VAR7 от общей суммы штрафов VAR6 в системе координат VAR5, VAR6, VAR7 показана на графике поверхности:



## ВЫВОДЫ

Функционирование системы контроля и тестирования изделий можно разбить на три этапа. Первый этап связан со средним временем тестирования изделий приборами контроля до 7.5 ед. времени. В этом случае достигается максимальная производительность: 61- 66 печатных плат за 480 ед. времени. Количество штрафов равно 0.

Второй этап – среднее время тестирования изделий приборами контроля с 7.5 ед. времени до 8.5 ед. времени, когда с ростом функции штрафа падает производительность тестирования печатных плат.

Третий этап, когда количество штрафа уже не влияет на производительность тестирования. Среднее время тестирования изделий с 8.5 ед. до 10 ед. времени. Количество выпущенных печатных плат снижается на треть.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА СИСТЕМ

Процесс извлечения (получения) информации строится на основе упорядоченных последовательных действий по сбору, накоплению, отражению, преобразованию, актуализации данных; такие процессы в информатике называются *информационными технологиями*, и их основными элементами являются технические средства и устройства, например, в телеграфе - телетайпное устройство, в телевидении - телевизор и т.д.

*Новые информационные технологии* - это *информационные технологии*, базирующиеся на новых, инфологических и компьютерных средствах получения, хранения, актуализации информации, знаний.

*Высокие технологии* - это технологии качественного изменения состава, характера, методов решаемых задач, технологии эволюции, а не функционирования.

*Пример.* Обычная («старая») технология вычислений ставит основную цель - найти решение задачи за приемлемое время и стоимость. Новая технология использования компьютерных пакетов ставит новую цель - найти решение достаточно быстро, точно и экономично. *Высокая технология* распределенных, квантовых вычислений ставит цель - найти решение задачи, не решаемой (труднорешаемой) обычными технологиями.

В узком понимании, *новая информационная технология* - использование вычислительной техники и систем связи для создания, сбора, передачи, хранения, обработки информации; она - часть информационного бизнеса.

Любая технология базируется на научно-теоретическом, инженерно-техническом, программном обеспечении. Само по себе это ядро еще не образует технологию. Для этого оно должно быть интегрировано и поддерживаемо сетевыми, пространственно-временными, организационными связями и отношениями. Должна быть система, сеть поддержки технологических отношений (TSN).

*Пример.* TSN система дистанционного обучения состоит из инфраструктуры - компьютерных сетей, протоколов их взаимодействия и т.д. Хаб (маршрутизатор) - элемент этой системы, но он управляется своим программным обеспечением (например, программа переключения), своим электрическим обеспечением. Хаб сам по себе - не технология. Программа Word - сама по себе не технология (хотя ее часто называют технологией подготовки и редактирования документов), а элемент технологии, определяемой как MS Office - технологии автоматизированного, компьютеризованного делопроизводства, автоматизации работ в офисе.

Традиционная (классическая) *информационная технология*, как правило, строится на базе хорошо формализуемых, структурируемых интеллектуальных процедур. *Новая информационная технология*, как правило, строится на основе плохо формализованных и структурированных интеллектуальных процедур.

Цивилизация возможна только при наличии информации, информационных потоков и обменов в обществе. Информация делает народы человечеством.

*Новые информационные технологии* бывают следующих базовых типов:

- **когнитивные технологии**, направленные большей частью на получение, хранение и актуализацию знаний, принятие интеллектуальных решений;
- **инструментальные технологии**, направленные на использование в качестве инструментария, среды для построения других технологий и для обслуживания их;
- **прикладные технологии**, направленные большей частью на решение проблем некоторой проблемной области (или областей);
- **коммуникативные технологии**, направленные большей частью на решение проблем связи, коммуникаций, общения.

Такое деление - весьма условное - и технология может с успехом быть и **прикладной**, и **когнитивной**, и **инструментальной**, и **коммуникативной**.

Возможно деление **информационных технологий** и по сфере использования:

- **информационные технологии в науке**;
- **в образовании**;
- **в проектировании и производстве**;
- **в управлении**;
- **в сфере услуг**;
- **в сфере быта**.

Можно также условно разбить все новые технологии на две группы - технологии корпоративной работы и технологии индивидуальной работы.

Рассмотрим **новые информационные технологии**, ограничиваясь содержательным простым их обзором

#### **ТЕХНОЛОГИЯ БАЗ ДАННЫХ (БД) И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БД (СУБД)**

**БД** - достаточно большие наборы структурированных данных некоторой предметной области, представленные на машинных носителях и имеющие общую и удобную структуру, единые организационно-методические, программно-технические и языковые средства обеспечения использования данных различными программами пользователей. В зависимости от способа и технологии представления данных, различают иерархические, сетевые или реляционные базы данных, табличные или страничные.

В последнее время распространяется технология удаленных **БД**. Она базируется на коллективном доступе пользователей к информационным ресурсам, сосредоточенным на едином компьютере или хост-компьютере, в диалоговом режиме по сетям передачи данных. Информационными продуктами здесь выступают **БД** разных предметных областей, а также различные директории, рубрикаторы и другие данные, облегчающие пользователю поиск по **БД**. Информационные услуги предоставляются благодаря наличию разнообразных средств поиска, обработки и выдачи информации. Информационные продукты и программные средства служат главными элементами банков данных или автоматизированных банков данных (АБД) - основной организационной формы, в которой развиваются современные технологии коммерческого распространения информации.

**Основными особенностями данной технологии**, определяющими ее достоинства и ее недостатки, являются:

- предоставление пользователю только информационных услуг, а не непосредственно информационных продуктов, в результате чего он получает (оплачивает) только действительно нужную информацию;
- полнота информации, связанная с загрузкой на мощные хост-компьютеры больших массивов данных;
- высокая скорость обновления, модификации и перемещения информации;
- развитое программное обеспечение, позволяющее не только находить и получать информацию, но и при необходимости осуществлять ее графическую, наукометрическую и эконометрическую обработку.

Интерактивные услуги АБД могут предоставляться в режимах: локальном, когда работа пользователя осуществляется с терминала, подключенного к хост-компьютеру;



удаленном, когда работа пользователя осуществляется с физически удаленного от хост-компьютера терминала по сетям связи.

**Пример.** В локальном режиме работают читатели библиотеки, осуществляющие поиск в АБД, который расположен на ее вычислительном центре, с терминалов по всему помещению библиотеки. В удаленном режиме можно работать, например, с библиотекой Конгресса США.

**СУБД** (DBMS - DataBase Management System) - программная система, обеспечивающая общение (интерфейс) программ пользователя и данных из *БД*.

#### **Основные функции СУБД:**

- управление данными во внешней памяти - обеспечение необходимых структур внешней памяти для хранения данных и манипулирования ими;

- управление буферными областями памяти - обеспечение копирования необходимой части *БД* в области (буфере) оперативной памяти, а также использование определенных правил манипулирования с буферами;

- управление транзакциями, т.е. последовательностями операций над *БД*, рассматриваемыми *СУБД* как одна макрооперация; каждая транзакция не изменяет *БД*, а, следовательно, можно выполнять различные транзакции, т.е. организовывать многопользовательскую работу с *БД* через *СУБД*, в том числе и параллельную;

- поддержание надежности хранения данных в *БД* через избыточность данных и журнал (часть *БД*, недоступная пользователям *СУБД* и тщательно копируемая; в нее поступают записи обо всех изменениях *БД*) с целью сохранения данных при сбоях аппаратуры или программы;

- поддержка языков *БД* (языков определения логической структуры *БД*, языков манипулирования данными) или единого интегрированного языка, содержащего необходимые средства для работы - от проектирования *БД* до обеспечения базового пользовательского интерфейса с *БД*.

**Пример.** База данных ГИБДД всех владельцев автотранспорта, из которой по запросам сотрудников ГИБДД можно оперативно извлечь, например, данные о владельце машины по номеру ее госрегистрации.

### **ТЕХНОЛОГИЯ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ**

Хранилище данных - очень большая специализированная *БД* и программная система, предназначенная для извлечения, коррекции (чистка, правка) и загрузки данных из источников в *БД* с многомерной структурой, включая средства упрощения доступа, анализа с целью принятия решения. Интеллектуальный анализ данных (Data Mining) - автоматический поиск скрытых ("не лежащих на поверхности") в больших базах данных взаимоотношений и связей с помощью математического и инфологического анализа, выделения трендов, кластеризации (кластерного анализа), классификации и распознавания (таксономии), шкалирования и т.д. Специальные модели и алгоритмы анализа извлекают из больших баз данных (или из других хранилищ данных, например, электронных таблиц) знания, позволяющие агрегировать, интегрировать и детализировать эти данные и, самое главное, принимать на их основе решения. Это, по сути, идентификация скрытых в них зависимостей.

**Пример.** Хранилища данных собирают и централизуют текущую информацию о состоянии дел корпорации, о ее услугах, клиентах, поставщиках, и предоставляют аналитические отчеты. С помощью анализа финансовых отчетов фирм, можно разбить их на классы по финансовой устойчивости, по вероятности банкротства, что поможет банку-кредитору осуществлять политику их кредитования более эффективно. Интеллектуальный анализ данных в геоинформационных системах может помочь обнаружить и визуализировать участки земной коры с залежами нефти, газа, сейсмоопасные. В бизнесе такой анализ может осуществляться для оценки надежности клиентов, выявления мошенничества, интерактивного маркетинга, анализ трендов и др. т.е. для Business Intelligence.

### **ТЕХНОЛОГИЯ БАЗ ЗНАНИЙ (БЗ) И ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ (ЭС)**

**БЗ** - накопление, структурирование и хранение с помощью ЭВМ знаний, сведений из различных областей таким организованным способом, что можно иметь доступ к этим знаниям, расширять их, получать, выводить новые знания и т.д.

*Пример.* БЗ по хирургическим операциям брюшной полости, из которой молодой и неопытный хирург в экстренной хирургической ситуации может извлечь необходимую информацию об операции; сама же БЗ разработана на основе знаний высокопрофессиональных и опытных хирургов.

**ЭС** - накопление опыта, знаний, умений, навыков высокого уровня профессионалов-экспертов, структурирование и хранение, актуализация с помощью ЭВМ с целью получения экспертных суждений по различным проблемам данной области.

*Пример.* Примером ЭС «Хирург» может быть экспертная система, построенная на основе приведенного выше примера БЗ. БЗ и ЭС тесно связаны. Примером другой ЭС может быть система «Таможня», которая дает возможность анализировать документацию о финансовых сделках, находить и выдавать подозрительные факты, исследовать их связи и давать рекомендации финансовым инспекторам.

**ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОЧТЫ** и телекоммуникационного доступа к удаленной от пользователя информации, носителю информации - человеку или компьютеру.

**Электронная почта** - система передачи сообщений с помощью компьютера отправителя и приема их с помощью компьютера получателя. **Телеконференция** - обмен сообщениями (докладами) между участниками (подписчиками) конференции, анонсированной на специальной доске объявлений в сети, в частности, на электронной доске объявлений. **Телеконференция** представляет собой технологию на базе программных средств интерактивного доступа к ресурсам сети и предназначена для обсуждения какой-либо тематики. С помощью **телеконференций** можно проводить консалтинг, обучение, совещание, автоматизацию офиса и др. Базовая система проведения видеоконференций обычно включает: мощную рабочую мультимедийную станцию; видеокамеру и специальную плату для сжатия видеoinформации; микрофон и видеомикрофон; средства сопряжения с используемой для проведения конференции сетью. **Телеконференции** могут проводиться как в режиме обмена письмами по **электронной почте** (режим почтового подключения), так и в режиме терминального интерактивного подключения через телекоммуникационные сети. В режиме терминального подключения пользователь может иметь доступ (подписку) к целой системе **телеконференций**, но, в отличие от режима почтового подключения, можно подключаться к заявленной конференции непосредственно в сети, с помощью специальных программ, управляющих работой пользователей с **телеконференциями**. Эти программы позволяют выполнять следующие манипуляции: найти конференцию; подписаться на конференцию (зарегистрироваться); перейти в конференцию; послать отклик (доклад); получить отклик (доклад); закрыть подписку и другие.

*Пример.* Рассмотрим медицинские видеоконференции (один из наиболее убедительных и ярких социально-экономических примеров использования **телеконференции**). В крупных больницах и клиниках сейчас имеется современное медицинское оборудование - томографы, эхокардиографы и др., а также достаточно высококвалифицированный медицинский персонал, с помощью которых в режиме видеодиалога (конференции) врачи из региональных (вплоть до районных) медицинских учреждений могут обсудить результаты диагностики больного, диагноза, методов и стратегий лечения. Проблема «приближения» этих средств и кадров особенно актуальна для нашей страны, с ее большой территорией.

**ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ (АС)** и автоматизированных рабочих мест (АРМ). АС - это человеко-машинная система для исполнения ежедневных, часто рутинных, профессионально выполняемых на рабочем месте сотрудника работ - с целью уменьшения затрат времени, сокращения числа ошибок и обеспечения оперативной связи

с другими сотрудниками; интеллектуальные системы имеют также способность к перестройке технологической цепочки, они способны и к обучению.

Возможны различные **системные цели автоматизации** (в зависимости от типа организации, структуры): эффективное управление потоками материальных, трудовых, информационных, энергетических ресурсов, повышение социальных, экономических и технических показателей системы и других систем (для управляющих систем); минимизация риска невыполнения планов и максимизация качества принятых решений, повышение конкурентоспособности, рентабельности (для производственных систем); получение новых знаний, повышение престижа в области инноваций, расширение сферы использования результатов исследования, создание «ноу-хау» и другие.

В последние годы распространилась концепция корпоративных и распределенных систем, в которых широко используются локальные информационные системы. Для реализации идеи распределенного управления необходимо создание автоматизированных рабочих мест на базе профессиональных компьютеров (рабочих станций).

**АРМ** - предметно-ориентированная инструментальная АС, устанавливаемая непосредственно на рабочем месте специалиста и предназначенная для автоматизации профессиональной деятельности (сидящего за этим рабочим столом сотрудника). Можно их определить как автоматизированные системы локального характера, соответствующие некоторому функциональному назначению. Несмотря на различный характер задач, решаемых с помощью **АРМ**, **принципы создания любых АРМ** должны быть общими:

- системность, во-первых, подхода к проектированию и решению задач и, во-вторых, возможность работы в составе сети, системы;
- гибкость, приспособляемость, адаптируемость к изменениям задач;
- устойчивость, надежность в работе, восстанавливаемость при сбоях;
- эффективность (по затратам, повышению производительности труда);
- быстрота отклика - минимум времени на каждый шаг диалога с пользователем;
- полнота выполняемых функций, решаемых профессиональных задач;
- интерактивность - возможность вмешиваться в диалог, выбирать следующий шаг диалога, например, в форме команд на специальном командном языке, в форме выбора объектов, в форме «меню», в смешанной форме;
- функциональность, дружелюбность, эргономические характеристики и удобство использования, в частности, ориентация на непрофессионала в области компьютерной подготовки и др.

**Пример.** **АРМ** секретаря-референта должен включать редактор текстов, электронную таблицу, переводчики, органайзер и другие. **АРМ** студента-экономиста должен иметь электронные учебники по изучаемым дисциплинам, обучающие программы и среды, электронные справочники и энциклопедии, переводчики, органайзер. **АРМ** администратора базы данных должен быть оснащен **СУБД**, электронным журналом администратора. **АРМ** управляющего должен обладать средствами описания управленческой деятельности в виде сетевого графика, системой контроля исполнения, системой согласования документов, системой электронной подписи, системой ведения совещания. **АРМ** статистика должен включать информационно-справочные базы и материалы, средства его обслуживания и поддержки, средства анализа статистических данных для оперативного составления докладов, справок и отчетов. **АРМ** банковского служащего и банковские системы - наиболее развиваемые системы. Они содержат программное и техническое обеспечение как специального назначения (для банковских расчетов и операций с банкоматами), так и для обеспечения безопасности таких систем.

Банковские системы используют локальные вычислительные сети, специализированные бизнес-серверы, ЭВМ общего назначения, технологию «**клиент-сервер**» и, часто, ОС UNIX, объединение несколько локальных сетей, межсетевой обмен и удаленный доступ филиалов банка к ресурсам центрального офиса банка для выполнения электронных платежей, транзакций. Банковские системы должны иметь средства адаптации к конкрет-

ным условиям эксплуатации. Для поддержки оперативной работы банка, банковская система должна функционировать в режиме реального времени OLTP (On-Line Transaction Processing, Онлайн-обработка Состыкровок).

#### **Основные функции:**

- автоматизация всех ежедневных внутрибанковских операций, ведение бухгалтерии и составление сводных отчетов;
- обеспечение связей с филиалами и отделениями;
- автоматизированное взаимодействие с клиентами (система «банк-клиент»);
- анализ деятельности банка и выбор оптимальных в данной ситуации решений;
- автоматизация розничных операций с банкоматами и кредитными карточками;
- межбанковские расчеты;
- автоматизация деятельности банка на рынке ценных бумаг (мониторинг курсов, объемов сделок и т.д.);
- оперативная информационная поддержка финансовой и кредитной политики.

#### **ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ОФИСА**

**Компьютерный офис** - офис, в котором имеется высокий уровень компьютеризации, внедрения АРМ, систем делопроизводства, так, что вся профессиональная деятельность офиса может быть успешно автоматизирована.

**Пример. Компьютерный офис** - это, например, офис, где работа осуществляется с использованием локальных сетей связи и интегрированной программной среды Microsoft Office, которая включает в себя все основные программные пакеты для выполнения типовых и регулярно выполняемых операций, работ в офисе, в частности, ведение делопроизводства, контроль исполнения и др. Microsoft Office имеет встроенный простой язык программирования - Visual Basic for Applications (VBA). Этот язык позволяет создавать новые приложения или корректировать и связывать старые, выполняемые в среде Microsoft Office, а также расширять возможности офиса, его приложений.

#### **Стандартное ядро Microsoft Office включает:**

- редактор текстов Microsoft Word;
- электронную таблицу Excel;
- систему для презентаций PowerPoint (функции - создание и проецирование на большом экране электронных презентаций, слайд-шоу, ярких пленок для проектора, раздаточных печатных материалов);
- систему управления базами данных Access.

Кроме приведенных стандартных приложений, имеются и следующие приложения: Office Assistant - помощник для подсказок; HTML- и Web-поддержку (Internet Assistants); различные программы-помощники (Graph - графическое представление данных, Organization Chart - создатель штатного расписания офиса, Equation Editor - редактор формул, WordArt - создатель логотипов, заголовков, ClipArt Gallery - для просмотра рисунков).

В дальнейшие модификации будут входить возможности одновременного показа презентаций по локальной сети, использование возможностей системы распознавания речи, визуальные среды разработки различных офисных приложений (например, заполнения платежных поручений), сайты **рабочих групп**, системы визуализации данных, система сканирования и ввода данных и др.

Технология **«Рабочая группа»** - технология совместной работы нескольких связанных между собой общими информационными ресурсами компьютеров (**«рабочей группы»**), объединенных для решения какой-либо общей задачи.

**Пример.** Типы **рабочих групп**: «Дирекция», «Бухгалтерия», «Канцелярия». Компьютерная сеть организации может объединять несколько **рабочих групп**. У каждого компьютера **рабочей группы** имеется идентификатор, имя в группе, например, по ФИО человека, на нем работающего. В **рабочей группе** «Бухгалтерия» может существовать компьютер (рабочее место) «Главбух» или «Иванов Сергей Николаевич».



**Рабочая группа** может быть и временной - для работы над конкретным проектом в пределах определенного промежутка времени.

**Пример.** Можно организовать **рабочую группу** «Презентация фирмы», которая состоит из компьютеров сотрудников фирмы, подготавливающих презентацию своей фирмы, или «Годовой отчет» - для подготовки годового финансового отчета фирмы. Все эти люди могут работать в разных отделах, но они составляют временную **рабочую группу**, чтобы было легко обмениваться информацией общего доступа при работе над отчетом.

Обмен информацией может происходить и между **рабочими группами**. Для этого не нужно физически перемещать компьютеры: чтобы сформировать **рабочую группу**, достаточно присвоить всем компьютерам, входящим в состав группы, ее имя.

**Пример.** Операционная система Windows for Workgroups позволяет выделение компьютеров в **рабочие группы** при ее инсталляции. Изменять состав и структуру **рабочей группы** затем можно из «Панели управления», запустив прикладную программу Network (сеть). При этом все компьютеры одной сети, независимо от их объединения в **рабочие группы**, имеют доступ к общим принтерам и файлам, а такие приложения как Mail (**Электронная почта**), Shedule+ (Ежедневник), работают только в пределах одной **рабочей группы**. Передача почты через Mail возможна только в пределах одной **рабочей группы**. Как правило, в небольших фирмах имеется одна **рабочая группа**.

Технология (модель взаимодействия) «**Клиент-сервер**» - это технология взаимодействия компьютеров в сети, в которой каждый из компьютеров имеет свое рабочее назначение. Этот принцип распространяется и на взаимодействие программ и информационных сред. Программа, выполняющая предоставление соответствующего набора услуг – «сервер», а программа, пользующаяся этими услугами – «клиент».

**Пример.** Сейчас говорят уже о принципиально иной концепции взаимодействия между элементами сети peer-to-peer (P2P), позволяющей отдельным компьютерам работать друг с другом напрямую.

**ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАКЕТОВ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ (ППП)** - технологии на базе специальным образом организованных комплексов программ для решения различных классов однотипных и часто встречающихся задач из различного типа предметных областей. Современные **ППП** имеют диалоговую, интерактивную обратную связь с пользователем в процессе постановки задачи, решения и анализа результатов. При решении задач применяют обычно используемый в предметной области интерфейс. «Интеллектуальность» **ППП** - возможность постановки задачи содержательно, не указывая алгоритма ее решения. Построение алгоритма решения и сборка целевой программы производятся автоматически и скрыто от пользователя. Предметное обеспечение **ППП** - база знаний о методах, алгоритмах решения задачи и о самих задачах. Программирование осуществляется в терминах предметной области, ЭВМ используется уже на этапе постановки задачи, решение задач - с помощью автоматического построения цепочки программ, по ходу накопления знаний о решаемой задаче, т.е. возможно пополнение базы знаний **ППП**. Используются инструментальные **ППП**, которые ускоряют и упрощают процесс создания **ППП** и снижают его стоимость. Для этого метода характерна высокая интеграция: наполнение **ППП** само состоит из **ППП** различного назначения.

**Пример.** В качестве примера интегрированного **ППП** приведем пакет MathCAD, предназначенный как для сложных математических вычислений, так и для несложных (в режиме инженерного калькулятора).

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИННОЙ ГРАФИКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ** - технологии, базирующиеся на системах рисования и черчения различных графических объектов и образов и устройств рисования (плоттеров), а также их визуального, наглядного представления. Особо следует отметить средства **анимации** – «оживления» изображений на экране, т.е. методы и средства создания динамических изображений, иначе говоря - компьютерных мультфильмов.



**Пример.** Примером средств машинной графики может служить программный комплекс изображения пространственных объектов и их динамической актуализации - пакет 3D-Studio. Этот пакет позволяет не только создавать трехмерные сцены, но и использовать их при реализации компьютерных анимационных ситуаций (мультипликаций) с использованием различных графических файлов разных форматов, что дает возможность применять при разработке мультфильмов известные графические пакеты: CorelDraw, PhotoPaint и др. 3D-Studio имеет модульную структуру, состоящую из пяти модулей, за каждым из которых закреплены задачи конкретного типа, решаемые в строгой последовательности. Первый модуль (2D-Shaper) является основным инструментом создания и редактирования плоских фигур, а также снабжения других модулей особыми геометрическими структурами, формами и траекториями. Для преобразования плоских фигур в трехмерные каркасные объекты имеется модуль 3D-Lofter, в который включены мощные средства генерации сложных пространственных форм и структур. Подготовленные двумерные планы моделей отображаются («выдавливаются») в третье измерение по специально заданным траекториям. Модуль 3D-Lofter снабжен средствами деформации, что позволяет создавать трехмерные объекты более сложных форм. Можно построить 3D-фигуру по трем проекциям на координатные плоскости. Современные технологии 3D-графического моделирования позволяют строить полные трехмерные объекты по их эскизам.

**Пример.** Программная среда LightWave Modeler позволяет, используя соответствующие графические примитивы, формировать графический персонаж, который легко анимируется по желанию (масштаб, направление, цвет и т.п.) пользователя.

#### **ГИПЕРТЕКСТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Гипертекст** (Hypertext – «сверхтекстовая, надтекстовая») - это технология на базе средств обработки больших, глубоко вложенных, структурированных, связанных семантически и понятийно текстов, информации, которые организованы в виде фрагментов (текста), которые относятся к одной и той же системе объектов, расположенных в вершинах некоторой сети и выделяемых обычно цветом; они дают возможность при машинной реализации быстро, нажатием нескольких клавиш, вызывать и помещать в нужное место просматриваемого или организуемого нового текста заданные фрагменты **гипертекста**, т.е. тексты, «привязанные» к выделенным по цвету ключевым словам или словосочетаниям; гипертекстовая технология позволяет определять, выбирать вариант актуализации информации **гипертекста** в зависимости от информационных потребностей пользователя и его возможностей, уровня подготовки, т.е. жестко и заранее не определяет сценарии диалога. При работе с гипертекстовой системой пользователь может просматривать документы (страницы текста) в том порядке, в котором ему это больше нравится, а не последовательно, как это принято при чтении книг, т.е. **гипертекст** - нелинейная структура. Достигается это путем создания специального механизма связи различных страниц текста при помощи гипертекстовых ссылок, т.е. кроме линейных ссылок обычного текста типа «текст-предшественник - текст-преемник», у **гипертекста** можно построить еще сколь угодно много других динамических ссылок, ассоциированных с документом в целом или только с отдельными его фрагментами, т.е. контекстные ссылки.

**Пример.** Примерами **гипертекстов** могут быть электронные журналы.

#### **СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ МУЛЬТИМЕДИА И ГИПЕРМЕДИА**

Медиа – «среда или носитель информации». Мультимедийность, многосредность - актуализация различных сред и чувств восприятия информации: средства озвучивания, оживления - мультипликации, графического и наглядного представления входных и выходных данных задачи и сценариев решения или даже самого решения.

**Пример.** Примерами средств **мультимедиа** могут служить звуковые карты (Sound Blaster) для генерирования на ЭВМ широкого диапазона звуков, звуковые колонки для их передачи и устройства считывания информации с компакт-дисков, позволяющие считывать большие объемы информации, например, некоторую сложную и длительную музы-

кальную композицию, а затем воспроизводить с использованием предыдущих двух средств *мультимедиа*.

Средства *гипермедиа* - средства на основе синтеза концепции *гипертекста* и *мультимедиа*, т.е. в гипертекстовые фрагменты могут быть «встроены» мультимедийное сопровождение, мультимедийные приложения: hypermedia=hypertext+multymedia.

**Пример.** Глобальной гипермедийной системой является WWW (World Wide Web – «Всемирная Паутина») - система навигации, поиска и доступа к гипертекстовым и мультимедийным ресурсам Интернета в реальном масштабе времени. Глобальной ее можно считать потому, что, в отличие от обычного (локального) *гипертекста*, ссылка на документ в нем может привести не только к другому документу (как в локальном *гипертексте*), но и к другому компьютеру (WWW-серверу), возможно, в другом полушарии. Работа ведется с помощью универсальной программы-клиента, которая позволяет объединить в единое целое клиента и сервер. Для доступа к WWW-серверу (информации на нем) необходимо знать адрес сервера со списком российских WWW-серверов, http (HyperText Transfer Protocol) - протокол работы с *гипертекстом*. Имеется система автоматического поиска по определенным ключам (запросам, разделам). Информация в WWW представлена в виде гипертекстового документа, включающего в себя различные типы данных (текст, графика, видео, аудио, ссылки на другие гипертекстовые документы и т.д.). Такие документы называют WWW-страницами. Эти страницы просматриваются с помощью браузеров. Страницы хранятся на компьютерах-узлах сети, которые называют сайтами (site). Каждый компьютер имеет свой уникальный IP-адрес URL (Uniform Resource Locator - универсальный локатор ресурсов), с помощью которого браузер знает, где находится информация и что надо с ней делать. Страница - основной элемент WWW. На них находится та информация, которую мы ищем в сети, или ссылки на эту информацию. Страницы, *гипертекст* - это легкая и быстрая в использовании, чрезвычайно мощная система связанных ключевых слов и фраз (ссылок), позволяющая ссылаться на другие ключевые слова и фразы других страниц. Эти ссылки обычно выделены другим цветом, и достаточно просто щелкнуть мышкой по выделенной ссылке, чтобы перейти к информации, на которую отсылает эта ссылка. Для создания гипертекстовых приложений (например, личной WWW-страницы) используется специальный язык HTML (HyperText Markup Language), позволяющий создавать гипертекстовый документ в любом текстовом редакторе формата ASCII, с подключением графических файлов двух основных форматов GIF, JPEG.

По мнению ряда исследователей, следующей после Web формой коллективного сосуществования компьютеров будет Grid, которая даст пользователям больше возможностей для работы с удаленными машинами. Если World Wide Web можно сравнить с аналоговой телефонной сетью, способной передавать тексты, аудио и видео, то Grid подобна современной системе электроснабжения, предоставляющей потребителям столько ресурсов, сколько им необходимо. В настоящее время в ЦЕРНе ведутся работы по определению стандартов для Grid. Так же, как и WWW, новая концепция, в первую очередь, будет востребована в исследовательских кругах. Ученые с помощью Grid будут получать доступ к ресурсам, необходимым для решения их задач. Архитектура Grid трехслойна: интерфейс, слой приложений и операционная система Grid, позволяющая подключить пользователей к распределенным ресурсам.

## **НЕЙРО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СЕТИ**

**Нейротехнологии** - технологии на базе моделей, методов, алгоритмов, программ, моделирующих, имитирующих нейронные сети и процессы решения задач *искусственного интеллекта*. Позволяют эффективно реализовывать параллелизм, самообучение, распознавание и классификацию, адаптивность, перестройку структуры, топологии.

**Пример.** Идентификация личности в криминологии; выбор управляющих воздействий в сложных системах; геологоразведка; диагностика в сейсмологии. Нейросистема VNS-736, например, позволяет обрабатывать (распознавать) изображения размером 512\*512 элементов.

**Пример.** Одной из распространенных зарубежных нейросистем является пакет BrainMaker. Пусть необходимо решить задачу прогноза цены закрытия на сегодняшних торгах по валютным тысячедолларовым трехмесячным фьючерсным контрактам. Пусть нас устраивает точность прогноза, при которой правильно указывается ценовой тренд (подъем, спад) и изменение цены с точностью не ниже 90% от последнего скачка. Применение нейронной сети начинается с подготовки входных данных: курс доллара, индекс инфляции, ставка межбанка, биржевые индексы, объем торгов, количество сделок, максимальные и минимальные цены и другие. После предварительной настройки сети начинается итерационный процесс обучения, в результате которого нейросеть настраивает свою логическую структуру для точной реакции рынка на те или иные воздействия. Для этого в пакете BrainMaker предусмотрен мощный аналитический блок, который позволяет увидеть, какие параметры оказывают позитивное влияние на ситуацию, а какие - негативное. Затем сеть снова обучается и далее тестируется на качество и адекватность, и после удачного тестирования используется для прогнозов. За десять биржевых дней сеть ни разу не ошиблась в знаке отклонения фьючерсных котировок, а девять дней из десяти отклонение прогноза от реальной цены составило менее 10 рублей. BrainMaker - это программа, с которой началась история применения нейронных сетей в России. В этом пакете на профессиональном уровне реализована классическая многослойная нейронная сеть. Это единственная программа, в которой есть возможность настройки всех параметров нейронных сетей и алгоритмов обучения. В последнее время BrainMaker чаще всего используется не как самостоятельная программа, а как надстройка к программе TradeStation для анализа в режиме реального времени. NeuroShell является универсальной программой и благодаря тому, что она была первой русифицированной нейросетевой программой с удобным интерфейсом, ей удалось завоевать широкое распространение на российском рынке. Для решения финансовых задач NeuroShell имеет модуль рыночных индикаторов, позволяющий использовать более 20 индикаторов технического анализа при работе с нейросетью.

**Пример.** Известное семейство российских программ NeuroScalp построено по модульному принципу. Базовым модулем является модуль классического технического анализа, в который интегрируются дополнительные модули, реализующие различные методы анализа финансовых рынков. В настоящее время доступны следующие дополнительные модули: «Экспертный модуль, российский рынок акций» - модуль, содержащий готовые нейросети для трех российских акций: РАО Газпром, РАО ЕЭС России, НК Лукойл; «Модуль Нейронных сетей» - эмулятор классических многослойных нейронных сетей с использованием генетических алгоритмов; «Модуль Карты Кохонена» - модуль, реализующий карты Кохонена в приложении к финансовым рынкам; «Модуль Статистика» - модуль статистической обработки финансовой информации и анализа рынка. NeuroScalp имеет удобный интерфейс и реализует необходимое множество методов, требуемое для реализации различных идей пользователя.

#### **ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

Виртуальная реальность - технологии актуализации различных гипотетических сред и ситуации, не существующих реально и возможных как варианты развития реальных аналогов систем реального мира; эти технологии и системы позволяют управлять виртуальным объектом, системой путем моделирования законов пространства, времени, взаимодействия, инерции и др.

Высшая форма развития *компьютерного офиса - виртуальный офис* и *виртуальная корпорация*. Офисы и корпорации, не существующие в обычном, классическом виде (имеющих вывеску, штат, здание), а созданные воображаемо, распределенно - как в пространстве, так и во времени (отделы и сотрудники могут находиться даже на различных континентах, общаясь по работе с помощью ЭВМ и сетей связи). Они являются высшей степенью делового сотрудничества и в корне меняют организацию работ и систему информационного обеспечения сотрудников.

Виртуализация свойств и атрибутов корпорации, динамическое (а иногда и виртуальное) выделение их общих фундаментальных (родовых, классовых) свойств, их описание и использование в рамках единой технологии, позволяет сократить промежуток между прогнозируемым (или имитируемым) состоянием корпорации и его реальным состоянием. У корпорации общие интересы появляются, актуализируются, виртуализируются на тот период, когда они служат общей цели. Успех **виртуальной корпорации** (ее разработки, внедрения и сопровождения) зависит от полноты и качества информационных потоков между объектами корпорации. При этом новые сотрудники корпорации имеют дело, в первую очередь, с информационными моделями, например, с моделями склада сырья, изделия, менеджера, поставщика, банка (банковских расчетов). Таким образом, **виртуальные** компьютерные **корпорации** поддерживают широкий спектр работ и услуг, начиная от соединения предприятий по ресурсам, производству, сбыту, снабжению, управлению, информационному обеспечению. Обеспечивают совокупность знаний и умений по организации, координации и согласованию общих организационных, материальных, информационных ресурсов элементов корпорации, поддержке и развитию инфраструктуры (архитектуры, инноваций, активов, рекламы и др.).

Основные характеристики **виртуальной корпорации**: наличие основного вида бизнеса (деятельности) для всех подсистем; концентрация пользователей вокруг этого вида деятельности и общие взаимосвязанные цели, планирование и ресурсообеспечение, общие (интегрированные) стратегии поведения и актуализации ресурсов, общая (интегрированная) технология актуализации ресурсов.

В **виртуальной корпорации** «новые рабочие или служащие» будут в основном иметь дело с инфологическими моделями рабочих мест, инструментов, сырья, поставщиков, рынков сбыта и услуг, «новые менеджеры» будут принимать оперативные и более интеллектуальные решения по гораздо более широкому кругу вопросов, а «новое руководство» будет занято многокритериальными стратегическими проблемами. Следовательно, от них требуется качественно новый уровень профессионализма, ответственности и стремление к самообразованию.

**Пример. Виртуальная маркетинговая корпорация** «Да Винчи» объединяет ряд горнорудных месторождений, производственные (машиностроительные и строительные), транспортные, инвестиционные, экологические системы. Все подсистемы «Да Винчи» поставляются без доработок под конкретный объект (как детские конструкторы сборно-разборного типа). Один из сценариев, предлагаемых в проекте (Venture Management Model), моделирует нижеследующую ситуацию. Горнодобывающая компания ведет разработки в Новой Гвинее. Построенный в этой местности отель может быть расширен для обслуживания растущего потока деловых клиентов этой компании, а также туристов. Консорциуму, имеющему бизнес в сфере коммуникаций и гостиничных услуг, предлагается доленое участие в развитии этой местности и эксплуатации отеля. Для снижения накладных расходов на расширение отеля и инфраструктуры туризма привлекаются крупные строительные компании (на условиях долевого участия в прибылях). Отметим при этом, что критерии эффективности бизнеса в таком составе - различны, а процесс принятия стратегических решений сопряжен с конфликтными интересами партнеров, динамически изменяющейся их картиной. Для реализации этой корпорации имеются **электронная** (мультимедийная) **почта** для поддержки процессов принятия решений первыми лицами, средства **телеконференций** для функциональных подразделений и аналитиков, геоинформационная система, САПР, взаимодействующая с **СУБД** через структуру данных с пространственной привязкой, система компьютерного делопроизводства на всех этапах. Используются современные технологии типа «**клиент-сервер**» и объектно-ориентированные под Windows NT, Windows-95 (рабочие места), Unix (сервер), полные версии MS Office и компьютерный документооборот. В системе электронного документооборота используются: полнотекстовый поиск, доступ к проектной документации на всех этапах жизненного цикла проекта, подготовка интерактивной технической документации.



Документ может содержать текст, например, HTML-документ, иллюстрации в одном или нескольких слоях, редакторские правки и комментарии участников различных *рабочих групп*, участвующих в проекте, трехмерные объекты из программ САПР, подключаемые к документу видео - и аудиофайлы.

**Пример.** Технологии виртуальной реальности широко используют различные тренажеры для обучения пилотов самолетов, водителей автомобилей, капитанов судов, которые позволяют помещать обучаемого в соответствующие воображаемые ситуации (включая и аварийные), в том числе и никогда не существовавшие в реальности и не укладывающиеся в рамки законов классической механики, физики; эффекты виртуальной реальности создаются часто за счет одновременного воздействия на различные органы чувств, включая подсознание, сенсомоторику.

Интересны проекты создания хирургических тренажеров с использованием методов и средств виртуальной реальности. Важной формой виртуальной реальности (виртуального понятия) является рынок. Если раньше под рынком понималось реальное место встречи продавцов и покупателей, то теперь это понятие состоит из экономических, коммерческих, производственных и коммуникационных отношений и систем; они теперь могут встречаться и реализовывать свои функции в компьютерных системах.

**КОГНИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** - методы, средства и приемы, обеспечивающие визуальное, гипермедийное представление условий задач и/или предметной области, которое помогает находить или стратегию решения (или само решение), либо позволяет оценивать и сравнивать пути решения, принять тот или иной адекватный выбор.

**Пример.** Когнитивная графика, позволяющая геометрически, образно представлять предметную среду и построить, исходя из этого, требуемый графический объект, в частности, пространственное представление этого объекта. Есть и средства, и методы визуального программирования (проектирования программ), в частности, среда Visual-C.

Когнитивные методы выбора решений в области бизнеса позволяют принимать решения и определять стратегии поведения на основе качественных данных, личностных суждений (эффективно для ликвидации неопределенностей). Например, модель принятия решений Института США и Канады РАН с помощью блоков типа «Мир», «Ценность», «Средство», «Интерес», «Стереотип», «Цель», «Сценарий», «Проблема», позволяет изменять содержательное наполнение этих блоков, генерировать новые цели и сценарии.

**ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО РЕИНЖИНИРИНГА** - методы и средства коренного пересмотра, перепроектирования информационных сетей и процессов с целью достижения порядковых улучшений в ключевых показателях информационных сетей и систем: производительность-стоимость, время-объем информации, функционирование-документация, технология-удобство. Реинжиниринговые мероприятия изменяют работу (из моноплановой она становится многоплановой), роль работника (от подконтрольного исполнителя - к принятию самостоятельных решений), оценку эффективности работы и оплаты труда (от оценки трудозатрат - к оценке результата), роль менеджера (от контролирующей функции - к тренинговой), и, самое главное, организационную структуру (от иерархической - к матричной и сетевой).

**Пример.** Сокращение времени принятия решения и цикла подготовки и подписания документов, например, средствами компьютерного делопроизводства, сетями связи и экспертными системами, которые обеспечивают доступ руководителя, принимающего решение, ко всем этапам, узлам и инструментариям подготовки решения; перенос акцента с проблемы «Как делать?» на проблему «Что делать?». Отметим, что популярную в информационных системах, сетях технологию «удаленный сервер данных и клиентский доступ» можно считать реинжиниринговой. *Реинжиниринг* системы подготовки докладов, отчетов, например, может свести цикл подготовки отчета с 20-30 операций до 5-10. Простое усовершенствование не может дать таких результатов.



**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** - технологии объектно-ориентированного анализа, технологии представления и актуализации информации, информационных процессов, систем, как совокупностей объектов и классов с использованием следующих понятий: объект, экземпляр класса - все то, что может быть полно описано некоторыми атрибутами состояния; класс - совокупность объектов с одинаковыми атрибутами; инкапсуляция - возможность отделения объектов и классов от внешнего мира; наследование - возможность создавать из классов-родителей новые классы-потомки, сохраняющие атрибуты и свойства родителей; полиморфизм - способность объектов выбирать метод представления на основе типов данных, актуализируемых сообщений).

Элементы объектно-ориентированного анализа: атрибуты - описания объектов, классов; операции - процессы, применяемые к классам объектов; потоки данных, реализующие связи между объектами; наследование - агрегирование и обобщение.

*Пример.* Объектно-ориентированные среды программирования, например, C++, Smalltalk; объектно-ориентированный инжиниринг или набор приемов и методов проектирования бизнеса, наиболее эффективно обеспечивающих заданные цели и прибыль; объектно-ориентированный пользовательский интерфейс, использующий, например, понятия «класс описаний», «класс языков», «класс операционных сред» и др. При объектно-ориентированном программировании в среде языка APL, например, процедуры исполняются в соответствии с логикой и инструкциями некоторой программы, которая определяет последовательность и содержание действий; выполнение этой программы инициируется с помощью сообщения, посылаемого заданному объекту пользователем, другой программой или объектом. Получатель сообщения решает, какая программа будет выполнена.

*Пример.* HTML - статичное средство. Чтобы «оживить» содержимое Web, сделать интерактивные HTML-страницы, используется среда JavaScript. Одной из важных для информатики объектно-ориентированных систем является Java-система, сред - Java-интерпретирующая машина, технологий - Java-технология. В основе всех их лежит язык программирования Java, ориентированный на сеть Internet и серверы WWW. Язык Java произошел от языка программирования Oak, с синтаксисом, близким к синтаксису языка C++. Средствами языка Java можно разрабатывать приложения для различных платформ: Intel Pentium, Macintosh, Sun и др. Java-программы бывают автономного использования (выполняемые в режиме интерпретации на конкретной компьютерной платформе) и апплеты, (applets), выполняемые в режиме интерпретации виртуальной Java-машиной, которая встроена практически во все современные браузеры. Апплеты Java встраиваются в документы HTML, хранящиеся на сервере WWW. С помощью апплетов можно сделать страницы сервера Web динамичными и интерактивными. Все данные для обработки апплеты могут получить только от сервера Web. Язык Java является объектно-ориентированным и имеет объемную библиотеку классов, значительно упрощающих разработку приложений, так как программист больше внимания может уделить функциональной части приложения, а не организации интерфейса, динамических массивов и т.п. В широком смысле, Java - это технология, изначально рассчитанная на интеграцию с сетевой Web-средой, полностью независимой от платформы. Виртуальная Java-машина - машина, на которой исходные Java-программы интерпретируются в коды этой машины. Это делает Java-среду мощным и удобным средством разработки клиентских компонентов Web-систем. В Java-среде пользователь может осуществлять динамическую загрузку объектов из сети, т.е. ему не нужны дорогостоящие работы по наладке, администрированию клиентских Java-систем, так как для обеспечения работы клиента на новой версии достаточно загрузить ее на сервере. Имеются инструментальные среды, например, Java Studio, позволяющие проектировать приложения вообще без программирования, из готовых компонент, устанавливая между ними связи и отношения в соответствии с внутренней логикой приложения. Для повышения производительности Java-приложений в браузерах используется компиляция Just-In-Time compilation («на лету»). При первой загрузке апплета его код транслируется в

обычную исполняемую программу, которая сохраняется на диске и запускается. В результате общая скорость выполнения апплета увеличивается в несколько раз.

**СРЕДО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** (интерактивные технологии проектирования, разработки, актуализации информационных систем, в которых сначала строится нужная среда, инструментарий, а затем происходит их автоматизированная настройка с помощью выполнения процедур типа: переместить, вставить, удалить, указать, активизировать и др.); готовые среды, «как кубики», объединяются в нужные структуры, а затем настраиваются на конкретные классы проблем или пользователей, причем изменения одних из них могут изменять и другие).

*Пример.* Средо-ориентированные системы программирования, в которых используется «оконный интерфейс», «оконная среда». Они основываются на понятиях «окно», «рамка», «фрейм», «рисунок на экране», «оконное меню. Каждый из них ассоциируется с наиболее подходящей инструментальной средой: тексты - с текстовым процессором, таблицы - с электронной таблицей, графики - со средой деловой графики. К этим типовым средам могут быть добавлены также и разработанные самим программистом среды, а также библиотеки сред. Отметим, что интерактивное планирование позволяет находить оптимальные структуры и набор ресурсов для достижения поставленной цели.

В последние годы вырос интерес к распределенным системам - программным комплексам, составные части которых функционируют на разных компьютерах в сети, используя при взаимодействии технологии различного уровня, от непосредственного использования пакетов TCP/IP до технологий с высоким уровнем абстракции, таких, например, как CORBA. В этих системах обеспечены *следующие возможности*, невыполнимые при использовании традиционных технологий:

- масштабируемость, т.е. эффективное обслуживание различного числа клиентов одновременно;
- надежность создаваемых приложений, т.е. устойчивость не только к ошибкам пользователей, но и к сбоям в системе коммуникаций;
- непрерывная длительная работа;
- высокий уровень безопасности системы, т.е. защиты и отслеживания, протоколирования информации на всех этапах функционирования;
- высокая скорость разработки приложений и простота их сопровождения и модификации (достаточен средний уровень программиста).

Технология CORBA создавалась некоммерческой организацией - содружеством разработчиков и пользователей программного обеспечения OMG как универсальная технология создания распределенных систем с использованием языков Java, C, Ada, Smalltalk, Delphi, Perl, Python и др. Клиентская часть может быть написана на любом языке программирования, поддерживающим CORBA.

Так как CORBA - стандартная инфраструктура разработки и использования различных платформ, ОС и приложений, то все спецификации CORBA являются полностью открытыми. CORBA реализует высокий уровень абстракции - все проблемы и описания взаимодействия с операционной системой или сетевыми средствами осуществляются на низком уровне и скрытно от прикладного программиста. Высокий уровень абстракции достигается за счет отображения инструкций на языке спецификаций - на конкретный язык программирования. CORBA может передавать данные различных типов: структуры, объединения и др. Предусмотрена система описания и контроля типов. Для каждого языка используется свое отображение данных на языке спецификаций. CORBA поддерживает статический и динамический способ организации удаленных вызовов и имеет развитые средства получения информации о серверах. CORBA обладает высоким уровнем устойчивости к сбоям за счет большей изоляции клиентов и серверов, автоматического сохранения состояния объектов, более мощной и продуманной схемы управления транзакциями. Управление транзакциями берет на себя так называемый Сервис Управления Транзакциями CORBA (Object Transaction Service). CORBA обеспечивает высокий уровень безопас-

ности. Предусмотрена идентификация пользователя, списки прав доступа к ресурсам, система аудита и многое другое. Интеграция CORBA и сети Интернет выполняется за счет использования протокола, построенного поверх TCP/IP, что позволяет использовать URL-имена в качестве имен для Службы Именования CORBA.

**CASE-ТЕХНОЛОГИИ** (Computer-Aided System Engineering-автоматизированное проектирование информационных систем, или технологии, позволяющие автоматизировать основные этапы и процедуры жизненного цикла информационных систем: от анализа исходного состояния и целей - до проектирования интерфейсов, привычных проектировщику, пользователю и основных процедур функционирования системы; чем больше этапов и процедур автоматизируется, тем лучше и быстрее получается информационная система, тем шире ее приложения).

**Пример.** Технология STRADIS (STRategic Architecture for the Deployment of Information Systems - стратегическая архитектура для развертывания информационных систем) определяет и поддерживает основные этапы жизненного цикла системы: цели, их приоритеты, требования к ресурсам, распределению работ, составу и содержанию проектной документации, методика выполнения процедур проектирования и программирования, тестирования и управления. Включает в себя следующий инструментарий для этого: графический редактор (графическая среда), СУБД, средства описания сценариев диалога с системой, выходных документов и др.

**ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ**, системы символьных преобразований, аналитических вычислений (системы, позволяющие производить автоматические преобразования формул и алгебраических выражений, в частности, приведение подобных членов в алгебраическом выражении, нахождение первообразной заданной аналитически функции, ее дифференцирование и т.д.).

**Пример.** Система Reduce для формульных преобразований, которая позволяет находить эквивалентные алгебраические выражения, так и вычислять их численные значения (в том числе и комплексные), суммировать конечные и бесконечные ряды (сумма - как функция!), производить алгебраические операции с полиномами, матрицами, интегрировать и дифференцировать.

**НЕЧЕТКИЕ ТЕХНОЛОГИИ** (обработки данных и вывода знаний, принятия решений на основе описания систем аппаратом нечетких множеств и нечеткой логики).

**Пример.** Медицинский диагноз часто основан на нечетких, неопределенных четко связях симптомов и болезней, их нечеткой зависимости, поэтому для компьютерной постановки диагноза, построения экспертной системы постановки диагноза эта технология особенно эффективна, так как позволяет делать нечеткие выводы, которые затем могут быть проверены. Проблемы дактилоскопии также могут быть решены эффективно с помощью нечетких систем распознавания отпечатков.

Все новые **информационные технологии**, так или иначе, используют методы и проблематику **искусственного интеллекта, инженерии знаний**, часто переплетаются и интегрируются.

Проблематику **искусственного интеллекта** составляют знания, информация о данной области, которые пока объективно непонятны, неточны, не формализуемы, не структурируемы, не актуализируемы доступными средствами (могут стать таковыми в процессе функционирования системы, приобретения знаний).

**Инженерия знаний** - наука, изучающая проблемы выявления, структурирования, формализации и актуализации знаний для разработки различного типа интеллектуальных систем, технологий.

Все новые **информационные технологий** должны обеспечивать целенаправленность, информативность, адекватность, точность, полноту, воспринимаемость и структу-

рированность сообщений, а также гибкость, комфортность, своевременность и простоту их актуализации во времени, в пространстве и информационно.

Все **информационные технологии** - основа многих других технологий, а также способ актуализации информации, основа мышления.

**Основные тенденции развития новых информационных технологий**, независимо от сферы их использования:

- возрастание роли и активности (актуальности) информационного ресурса, т.е. качество и оперативность принимаемых интеллектуальных решений в обществе во все большей степени зависит от содержания, точности и своевременности получаемой информации, ее пространственно-временных характеристик;

- развитие способности к активному техническому, программному и технологическому взаимодействию (стандартизации и совместимости таких взаимодействий), т.е. появление более совершенных стандартов взаимодействия, все чаще - уже на уровне проектных работ, на уровне разработки спецификаций;

- изменение структуры инфологических и структурных взаимодействий, ликвидация промежуточных звеньев, т.е. устранение этапов и функций посредников информационного обмена и услуг, ликвидация промежуточных функций внутри компаний и между ними, более широкое распространение, упрощение доступа, снижение цен и т.д.;

- глобализация или использование пространственных, временных и организационных возможностей и емкости информационного рынка (практически беспредельного);

- конвергенция или формирование рынка новых **информационных технологий**. Рынок состоит из основных сегментов: частное потребление - развлечения, бытовые услуги; обеспечение бизнеса - производство, продажа, маркетинг; интеллектуальная профессиональная работа - автоформализация профессиональных знаний.

**Пример.** В 1990 г. около 40% интеллектуальных работников в США использовали на своих рабочих местах новые **информационные технологии**, в частности, концерн Microsoft инвестирует в новые медиапроекты до 20% своего научного бюджета, выпуская энциклопедии и справочники на CD, работая параллельно с телевидением в сети Интернет, открывая свои мультимедийные журналы, например, Slate.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Казиев, В.М. Курс: Введение в анализ, синтез и моделирование систем [Электронный ресурс]/ В.М. Казиев// - INTUIN.ru.

2 Советов, Б.Я. Моделирование систем [Текст]/ Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. -М.: ВШ, 2001.

3 Альянах, И.Н. Моделирование вычислительных систем [Текст]/ И.Н. Альянах. - Л.: Машиностроение, 1988.

4 Максимей, И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ [Текст]/ И.В. Максимей.- М: Радио и связь, 1988.

5 Технология системного моделирования [Текст]/ под. ред.С.В. Емельянова. - М: Машиностроение, 1988.

6 Шрайбер, Т. Дж. Моделирование на GPSS [Текст]/ Т. Дж. Шрайбер. — М.: Машиностроение, 1980. — 592 с.

7 Бражник, А. Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS WORLD [Текст]/ А. Н. Бражник. — СПб.: Реноме, 2006. — 439 с.

8 Томашевский В., Имитационное моделирование в среде GPSS [Текст]/ В. Томашевский, Е. Жданова. — М.: Бестселлер, 2003. — 416 с.

9 Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 [Текст]/ Ю. Г. Карпов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 400 с.

10 Кокин, А.Г. Имитационное моделирование систем массового обслуживания [Текст]: методические указания/ А.Г. Кокин. – Курган, Изд-во КГУ, 2002.

- 11 Кокин, А.Г . Моделирование систем [Текст]: учебное пособие/ А.Г . Кокин. - Курган, Изд-во КГУ, 1998.
- 12 Котов, В.Е. Сети Петри [Текст]/ В.Е. Котов. - М., 1984.
- 13 Шеннон, Р. Имитационное моделирование производственных систем [Текст]/ Р. Шеннон. - М.: Машиностроение, 1983. - 416с.
- 14 Советов Б.Я. Моделирование систем. Практикум [Текст]: учебное пособие для вузов/ Б.Я. Советов, С.А Яковлев, - М.: ВШ, 2003.- 230с.
- 15 Афонин П. Система оптимизации на основе имитационного моделирования. <http://www.bioinformatix.ru>.
- 16 Математическое моделирование и оптимизация системы массового обслуживания. <http://www.BestReferat>.



УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Кокин Александр Георгиевич

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактор Н.М. Кокина

---

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. №1
Печать трафаретная	Усл. печ. л. 12,25	Уч.-изд. л. 12,25
Заказ	Тираж: электр. вар.	Цена свободная

---

Редакционно-издательский центр КГУ  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25  
Курганский государственный университет.