

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО  
ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.03 Основы компьютерного моделирования АСОИ

**Направление подготовки (специальность)**

09.04.01 Информатика и вычислительная техника

**Профиль подготовки (специализация)**

“Автоматизированные системы обработки информации и управления”

**Форма обучения очная**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

1.	Тематическое содержание дисциплины .....	3
----	--	---

# 1. Тематическое содержание дисциплины

## Раздел 1. Модели и моделирование

### 1.1. Тема 1: Современное состояние проблемы моделирования систем.

Моделирование как метод научного познания. Использование моделирования при исследовании и проектировании сложных систем. Перспективы развития методов и средств моделирования систем в свете новых информационных технологий (2 часа)

#### 1.1.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:

##### 1. Моделирование как метод научного познания

*Моделирование: метод, инструмент, сферы использования.*

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 (аналитических и имитационных), реализуемых на современных ЭВМ, которые в этом случае выступают в качестве инструмента экспериментатора с моделью системы.

В настоящее время нельзя назвать область человеческой деятельности, в которой в той или иной степени не использовались бы методы моделирования. Особенно это относится к сфере проектирования и использования автоматизированных информационных систем (АИС), одним из классов которых являются автоматизированные системы обработки информации (АСОИ), где основными являются процессы сбора, обработки, хранения, передачи и использования информации.

*Методологическая основа моделирования.*

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

В научных исследованиях большую роль играют гипотезы, т.е. определенные предсказания, основывающиеся на небольшом количестве опытных данных, наблюдений, догадок. Быстрая и полная проверка выдвигаемых гипотез может быть проведена в ходе специально поставленного эксперимента. При формулировании и проверке правильности гипотез большое значение в качестве метода суждения имеет аналогия. Аналогией называют суждение о каком-либо частном сходстве двух объектов, причем такое сходство может быть существенным и несущественным.

Необходимо отметить, что понятия существенности и несущественности сходства или различия объектов условны и относительны. Существенность сходства (различия) зависит от уровня абстрагирования и в общем случае определяется конечной целью проводимого исследования. Современная научная гипотеза создается, как правило, по аналогии с проверенными на практике научными положениями. Таким образом, аналогия связывает гипотезу с экспериментом.

Гипотезы и аналогии, отражающие реальный, объективно существующий мир, должны обладать наглядностью или сводиться к удобным для исследования логическим схемам; такие логические схемы, упрощающие рассуждения и логические построения или позволяющие проводить эксперименты, уточняющие природу явлений, называются моделями. Другими словами, модель (лат. *modulus* – мера) – это объект-заместитель объекта-оригинала, обеспечивающий изучение некоторых свойств оригинала.

### *Определение моделирования.*

Моделирование может быть определено как представление объекта моделью для получения информации об этом объекте путем проведения экспериментов с его моделью.

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.

Процесс моделирования предполагает наличие:

- объекта исследования;
- исследователя, перед которым поставлена конкретная задача;
- модели, создаваемой для получения информации об объекте и необходимой для решения поставленной задачи.

Причем по отношению к модели исследователь является, по сути дела, экспериментатором, только в данном случае эксперимент проводится не с реальным объектом, а с его моделью. Такой эксперимент для инженера есть инструмент непосредственного решения организационно-технических задач.

Любой эксперимент может иметь существенное значение в конкретной области науки только при специальной его обработке и обобщении. Единичный эксперимент никогда не может быть решающим для подтверждения гипотезы, проверки теории. Поэтому инженеры (исследователи и практики) должны быть знакомы с элементами современной методологии теории познания и, в частности, не должны забывать основного положения материалистической философии, что именно экспериментальное исследование, опыт, практика являются критерием истины.

## 2. Использование моделирования при исследовании и проектировании сложных систем

### *Особенности разработки систем.*

Системы информатики и вычислительной техники (ИВТ), автоматизированные системы обработки информации и управления АСОИУ), информационные системы (ИС) относятся к классу больших систем, этапы проектирования, внедрения, эксплуатации и эволюции которых в настоящее время невозможны без использования различных видов моделирования.

На всех перечисленных этапах для сложных видов различных уровней необходимо учитывать следующие особенности:

- сложность структуры и стохастичность связей между элементами;
- неоднозначность алгоритмов поведения при различных условиях;
- большое количество параметров и переменных;
- неполноту и недетерминированность исходной информации;
- разнообразие и вероятностный характер воздействий внешней среды и т.д.

Ограниченнность возможностей экспериментального исследования больших систем делает актуальной разработку методики их моделирования, которая позволила бы в соответствующей форме представить процессы функционирования систем, описание протекания этих процессов с помощью математических моделей, получение результатов экспериментов с моделями по оценке характеристики исследуемых объектов.

Независимо от разбиения конкретной сложной системы на подсистемы при проектировании каждой из них необходимо выполнить:

- внешнее проектирование (макропроектирование) и
- внутреннее проектирование (микропроектирование).

Так как на этих стадиях разработчик преследует различные цели, то и используемые при этом методы и средства моделирования могут существенно отличаться.

На стадии макропроектирования должна быть разработана обобщенная модель процесса функционирования сложной системы, позволяющая разработчику получить

ответы на вопросы об эффективности различных стратегий управления объектом при его взаимодействии с внешней средой.

Стадию внешнего проектирования можно разбить на анализ и синтез.

При анализе изучают объект управления, строят модель воздействий внешней среды, определяют критерии оценки эффективности, имеющиеся ресурсы, необходимые ограничения. Конечная цель стадии анализа – построение модели объекта управления для оценки его характеристик.

При синтезе на этапе внешнего проектирования решаются задачи выбора стратегии управления на основе модели объекта моделирования, т.е. сложной системы.

На стадии микропроектирования разрабатывают модели с целью создания эффективных подсистем. Причем используемые методы и средства моделирования зависят от того, какие конкретно обеспечивающие подсистемы разрабатываются: информационные, математические, технические, программные и т.д.

*Особенности использования моделей.*

Выбор метода моделирования и необходимая детализация моделей существенно зависят от этапа разработки сложной системы.

На этапах обследования объекта управления, например промышленного предприятия, разработки технического задания и проектирования автоматизированной системы управления модели в основном носят описательный характер и преследуют цель наиболее полно представить в компактной форме информацию об объекте, необходимую разработчику системы.

На этапах разработки технического и рабочего проектов систем, модели отдельных подсистем детализируются, и моделирование служит для решения конкретных задач проектирования, т.е. выбора оптимального по определенному критерию при заданных ограничениях варианта из множества допустимых. Поэтому в основном на этих этапах проектирования сложных систем используются модели для целей синтеза.

Целевое назначение моделирования на этапе внедрения и эксплуатации сложных систем – это проигрывание возможных ситуаций для принятия обоснованных и перспективных решений по управлению объектом. Моделирование (имитацию) также широко применяют при обучении и тренировке персонала автоматизированных систем управления, вычислительных комплексов и сетей, информационных систем в различных сферах. В этом случае моделирование носит характер деловых игр. Модель, реализуемая обычно на ЭВМ, воспроизводит поведение управляемого объекта и внешней среды, а люди в определенные моменты времени принимают решения по управлению объектом. АСОИУ являются системами, которые развиваются по мере эволюции объекта управления, появления новых средств управления и т.д.

Поэтому при прогнозировании развития сложных систем роль моделирования очень высока, так как это единственная возможность ответить на многочисленные вопросы о путях дальнейшего эффективного развития системы и выбора из них наиболее оптимального.

### 3. Перспективы развития методов и средств моделирования систем в свете новых информационных технологий

*Аналитические и имитационные методы.*

Исторически первым сложился аналитический подход к исследованию систем, когда ЭВМ использовалась в качестве вычислителя по аналитическим зависимостям. Анализ характеристик процессов функционирования больших систем с помощью только аналитических методов исследования наталкивается обычно на значительные трудности, приводящие к необходимости существенного упрощения моделей либо на этапе их построения, либо в процессе работы с моделью, что может привести к получению недостоверных результатов.

Поэтому в настоящее время наряду с построением аналитических моделей большое

внимание уделяется задачам оценки характеристик больших систем на основе имитационных моделей, реализованных на современных ЭВМ с высоким быстродействием и большим объемом оперативной памяти.

Причем перспективность имитационного моделирования как метода исследования характеристик процесса функционирования больших систем возрастает с повышением быстродействия и оперативной памяти ЭВМ, с развитием математического обеспечения, совершенствованием банков данных и периферийных устройств для организации диалоговых систем моделирования.

Это, в свою очередь, способствует появлению новых «чисто машинных» методов решения задач исследования больших систем на основе организации имитационных экспериментов с их моделями. Причем ориентация на автоматизированные рабочие места на базе персональных ЭВМ для реализации экспериментов с имитационными моделями больших систем позволяет проводить не только анализ их характеристик, но и решать задачи структурного, алгоритмического и параметрического синтеза таких систем при заданных критериях оценки эффективности и ограничениях.

Достигнутые успехи в использовании средств вычислительной техники для целей моделирования часто создают иллюзию, что применение современной ЭВМ гарантирует возможность исследования системы любой сложности. При этом игнорируется тот факт, что в основу любой модели положено трудоемкое по затратам времени и материальных ресурсов предварительное изучение явлений, имеющих место в объекте-оригинале. И от того, насколько детально изучены реальные явления, насколько правильно проведена их формализация и алгоритмизация, зависит в конечном итоге успех моделирования конкретного объекта.

#### *Средства моделирования систем.*

Расширение возможностей моделирования различных классов больших систем неразрывно связано с совершенствованием средств вычислительной техники и техники связи.

Перспективным направлением для моделирования является создание иерархических многомашинных вычислительных систем и сетей.

При создании больших систем их компоненты разрабатываются различными коллективами, которые используют средства моделирования при анализе и синтезе отдельных подсистем. При этом разработчикам необходимы оперативный доступ к программно-техническим средствам моделирования, а также оперативный обмен результатами моделирования отдельных взаимодействующих подсистем.

Таким образом, появляется необходимость в создании диалоговых систем моделирования, для которых характерны следующие особенности:

- возможность одновременной работы многих пользователей, занятых разработкой одной или нескольких систем;
- доступ пользователей к программно-техническим ресурсам системы моделирования, включая, базы данных и знаний, пакеты прикладных программ моделирования;
- обеспечение диалогового режима работы с различными вычислительными машинами и устройствами, включая цифровые и аналоговые вычислительные машины;
- установки натурного и физического моделирования;
- элементы реальных систем и т. п.;
- диспетчеризация работ в системе моделирования и оказание различных услуг пользователям, включая обучение работе с диалоговой системой моделирования при обеспечении дружественного интерфейса.

В зависимости от специфики исследуемых объектов в ряде случаев эффективным оказывается моделирование на аналоговых вычислительных машинах (АВМ). При этом надо иметь в виду, что АВМ значительно уступают ЭВМ по точности и логическим возможностям, но по быстродействию, схемной простоте реализации, сопрягаемости с

датчиками внешней информации АВМ превосходят ЭВМ или, по крайней мере, не уступают им.

Для сложных динамических объектов перспективным является моделирование на базе гибридных (аналого-цифровых) вычислительных комплексов.

Такие комплексы реализуют преимущества цифрового и аналогового моделирования и позволяют наиболее эффективно использовать ресурсы ЭВМ и АВМ в составе единого комплекса. При использовании гибридных моделирующих комплексов упрощаются вопросы взаимодействия с датчиками, установленными на реальных объектах, что позволяет, в свою очередь, проводить комбинированное моделирование с использованием аналого-цифровой части модели и натурной части объекта. Такие гибридные моделирующие комплексы могут входить в состав многомашинного вычислительного комплекса, что еще больше расширяет его возможности с точки зрения моделируемых классов больших систем.

**1.2. Тема 2:** Основные понятия теории моделирования систем. Принципы системного подхода в моделировании систем. Общая характеристика проблемы моделирования систем (2 часа).

### **1.2.1 Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:**

#### 1. Принципы системного подхода в моделировании систем

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. Объясняется это в первую очередь технологичностью моделей, реализованных на базе средств вычислительной техники: достаточно высокой скоростью получения результатов моделирования и их сравнительно невысокой себестоимостью.

В настоящее время при анализе и синтезе сложных (больших) систем получил развитие системный подход, который отличается от классического (или индуктивного) подхода. Последний рассматривает систему путем перехода от частного к общему и синтезирует (конструирует) систему путем слияния ее компонент, разрабатываемых раздельно. 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. Эту особенность учтем в следующих определениях системы.

Система  $S$  – целенаправленное множество взаимосвязанных элементов любой природы.

Внешняя среда  $E$  – множество существующих вне системы элементов любой природы, оказывающих влияние на систему или находящихся под ее воздействием.

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. Важны выделение самой системы  $S$  и

внешней среды  $E$  из объективно существующей реальности и описание системы исходя из общесистемных позиций. При системном подходе к моделированию систем необходимо прежде всего четко определить цель моделирования. Поскольку невозможно полностью смоделировать реально функционирующую систему (систему-оригинал, или первую систему), создается модель (система-модель, или вторая система) под поставленную проблему.

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. Поэтому необходимо иметь критерий отбора отдельных элементов в создаваемую модель.

#### *Подходы к исследованию систем.*

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, прежде всего, отнести структурный и функциональный.

При структурном подходе выявляются состав выделенных элементов системы  $S$  и связи между ними. Совокупность элементов связей между ними позволяет судить о структуре системы. Последняя, 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.

Менее общим является функциональное описание, когда рассматриваются отдельные функции, т.е. алгоритмы поведения системы, и реализуется функциональный подход, оценивающий 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 либо некоторых характеристик элементов  $S;W$  и подсистем  $S_t$  системы, либо системы  $S$  в целом.

При наличии некоторого эталона сравнения можно ввести:

- количественные характеристики систем, для которых вводятся числа, выражающие отношения между данной характеристикой и эталоном;
- качественные характеристики систем, которые находятся, например, с помощью метода экспертных оценок.

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. Существуют различные подходы к выбору критериев 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.  $S' = S'(M)$ , и может рассматриваться по отношению к внешней среде  $E$ .

Наиболее просты методы по представлению модели, в которых сохраняется прямая аналогия явления. Применяют также модели, в которых нет прямой аналогии, а сохраняются лишь законы и общие закономерности поведения элементов системы  $S$ . Правильное понимание взаимосвязей как внутри самой модели  $M$ , так и взаимодействия

ее с внешней средой Е в значительной степени определяется тем, на каком уровне находится наблюдатель.

Простой подход к изучению взаимосвязей между отдельными частями модели предусматривает рассмотрение их как отражение связей между отдельными подсистемами объекта.

Такой классический подход может быть использован при создании достаточно простых моделей.

Реальный объект, подлежащий моделированию, разбивается на отдельные подсистемы, т.е. выбираются исходные данные Д для моделирования и ставятся цели Ц, отображающие отдельные стороны процесса моделирования. По отдельной совокупности исходных данных Д ставится цель моделирования отдельной стороны функционирования системы, на базе этой цели формируется некоторая компонента К будущей модели. Совокупность компонент объединяется в модель М.

Таким образом, разработка модели М 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.

Если ставится задача проектирования АСОИ, то с позиции системного подхода нельзя забывать о том, что эта система является составной частью АСУ объединением.

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 М. 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.

## 2 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.

Важное значение при создании реальных систем S имеют математические методы анализа и синтеза, целый ряд открытий базируется на чисто теоретических изысканиях.

### *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. Если раньше моделирование означало реальный физический эксперимент либо построение макета, имитирующего реальный процесс, то в настоящее время появились новые виды моделирования, в основе которых лежит постановка не только физических, но также и математических экспериментов.

Моделирование базируется на некоторой аналогии реального и мысленного эксперимента. Аналогия – основа для объяснения изучаемого явления, однако критерием истины может служить только практика, только опыт. Хотя современные научные гипотезы могут создаться чисто теоретическим путем, но, по сути, базируются на широких практических знаниях. Для, объяснения 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 осуществляют 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 различных точках и т.д. В основе любого вида моделирования лежит некоторая модель, имеющая соответствие, базирующееся на некотором общем качестве, характеризующем 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, одновременно в процессе эксперимента с моделью вводится управляющая информация, существенное место занимает обработка полученных результатов, т.е. информация лежит в основе всего процесса моделирования.

#### *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:

1) Цель функционирования, которая определяет степень целенаправленности поведения модели  $M$ . В этом случае модели могут быть разделены на однозначные, предназначенные для решения одной задачи, и многоцелевые, позволяющие разрешить или рассмотреть ряд сторон функционирования реального объекта.

2) Сложность, учитывая, что модель  $M$  является совокупностью отдельных элементов и связей между ними, можно оценить по общему числу элементов в системе и связей между ними. По разнообразию элементов можно выделить ряд уровней иерархии, отдельные функциональные подсистемы в модели  $M$ , ряд входов и выходов и т.д., т.е. понятие сложности может быть идентифицировано по целому ряду признаков.

3) Целостность, указывающая на то, что создаваемая модель  $M$  является одной целостной системой  $S(M)$ , включает в себя большое количество составных частей (элементов), находящихся в сложной взаимосвязи друг с другом.

4) Неопределенность, которая проявляется в системе: по состоянию системы, возможности достижения поставленной цели, методам решения задач, достоверности исходной информации и т.д. Основной характеристикой неопределенности служит такая мера информации, как энтропия, позволяющая в ряде случаев оценить количество управляющей информации, необходимой для достижения заданного состояния системы.

5) Поведенческая страта, которая позволяет оценить эффективность достижения системой поставленной цели. В зависимости от наличия случайных воздействий можно различать детерминированные и стохастические системы, по своему поведению – непрерывные и дискретные и т.д. Поведенческая страта рассмотрения системы  $S$  позволяет применительно к модели  $M$  оценить эффективность построенной модели, а также точность и достоверность полученных при этом результатов. Очевидно, что поведение модели  $M$  не обязательно совпадает с поведением реального объекта, причем часто моделирование может быть реализовано на базе иного материального носителя.

6) Адаптивность, которая является свойством высокоорганизованной системы. Благодаря адаптивности удается приспособиться к различным внешним возмущающим факторам в широком диапазоне изменения воздействий внешней среды. Применительно в модели существенна возможность ее адаптации в широком спектре возмущающих воздействий, а также изучение поведения модели в изменяющихся условиях, близких к реальным. Надо отметить, что существенным может оказаться вопрос устойчивости модели к различным возмущающим воздействиям. Поскольку модель М – сложная система, весьма важны вопросы, связанные с ее существованием, т.е. вопросы живучести, надежности и т.д.

7) Организационная структура системы моделирования, которая во многом зависит от сложности модели и степени совершенства средств моделирования. Одним из последних достижений в области моделирования можно считать возможность использования имитационных моделей для проведения машинных экспериментов. Необходимы оптимальная организационная структура комплекса технических средств, информационного, математического и программного обеспечений системы моделирования  $S'(M)$ , оптимальная организация процесса моделирования, поскольку следует обращать особое внимание на время моделирования и точность получаемых результатов.

8) Управляемость модели, вытекающая из необходимости обеспечивать управление со стороны экспериментаторов 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. Управляемость системы тесно связана и со степенью автоматизации моделирования.

9) Возможность развития модели, которая исходя из современного состояния науки и техники, позволяет создавать мощные системы моделирования  $S(M)$  для исследования многих сторон функционирования реального объекта. Однако нельзя при создании системы моделирования ограничиваться только задачами сегодняшнего дня. Необходимо предусматривать возможность развития системы моделирования как по горизонтали в смысле расширения спектра изучаемых функций, так и по вертикали в смысле расширения числа подсистем, т. е. созданная система моделирования должна позволять применять новые современные методы и средства. Естественно, что интеллектуальная система моделирования может функционировать только совместно с коллективом людей, поэтому к ней предъявляют эргономические требования.

### **1.3. Тема 3: Возможности и эффективность моделирования систем на вычислительных машинах. Средства моделирования систем. Обеспечение моделирования. Эффективность моделирования систем на вычислительных машинах (2 часа).**

#### **1.3.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:**

##### **1 Средства моделирования систем**

###### ***ЭВМ – основное средство моделирования систем***

Появление современных ЭВМ было решающим условием широкого внедрения аналитических методов в исследование сложных систем.

Стало казаться, что модели и методы, например, математического программирования, станут практическим инструментом решения задач управления в больших системах. Действительно, были достигнуты значительные успехи в создании новых математических методов решения этих задач, однако математическое

программирование так и не стало практическим инструментом исследования процесса функционирования сложных систем, так как модели математического программирования оказались слишком грубыми и несовершенными для их эффективного использования.

Необходимость учета стохастических свойств системы, недетерминированности исходной информации, наличия корреляционных связей между большим числом переменных и параметров, характеризующих процессы в системах, приводят к построению сложных математических моделей, которые не могут быть применены в инженерной практике при исследовании таких систем аналитическим методом.

Пригодные для практических расчетов аналитические соотношения удается получить лишь при упрощающих предположениях, обычно существенно искажающих фактическую картину исследуемого процесса.

Поэтому в последнее время все ощутимее потребность в разработке методов, которые дали бы возможность уже на этапе проектирования систем исследовать более адекватные модели.

Указанные обстоятельства приводят к тому, что при исследовании больших систем все шире применяют методы имитационного моделирования.

Наиболее конструктивным средством решения инженерных задач на базе моделирования в настоящее время стали ЭВМ.

Современные ЭВМ можно разделить на две группы:

- универсальные, прежде всего предназначенные для выполнения расчетных работ;
- управляющие, позволяющие проводить не только расчетные работы, но прежде всего приспособленные для управления объектами в реальном масштабе времени.

Управляющие ЭВМ могут быть использованы как для управления технологическим процессом, экспериментом, так и для реализации различных имитационных моделей.

#### *Пути использования ЭВМ для моделирования систем*

В зависимости от того, удается ли построить достаточно точную математическую модель реального процесса, или вследствие сложности объекта не удается проникнуть вглубь функциональных связей реального объекта и описать их какими-то аналитическими соотношениями, можно рассматривать два основных пути использования ЭВМ:

- 1) как средства расчета по полученным аналитическим моделям;
- 2) как средства имитационного моделирования.

Для известной аналитической модели, полагая, что она достаточно точно отображает исследуемую сторону функционирования реального физического объекта, перед вычислительной машиной стоит задача расчета характеристик системы по каким-либо математическим соотношениям при подстановке числовых значений. В этом направлении вычислительные машины обладают возможностями, практически зависящими от порядка решаемого уравнения и от требований к скорости решения, причем могут быть использованы как ЭВМ, так и АВМ.

При использовании ЭВМ разрабатывается алгоритм расчета характеристик, в соответствии с которым составляются программы (либо генерируются с помощью пакета прикладных программ) дающие возможность осуществлять расчеты по требуемым аналитическим соотношениям. Основная задача исследователя заключается в том, чтобы попытаться описать поведение реального объекта одной из известных математических моделей.

Использование АВМ, с одной стороны, ускоряет для достаточно простых случаев процесс решения задачи, с другой стороны, могут возникать погрешности, обусловленные наличием дрейфа параметров отдельных блоков, входящих в АВМ, ограниченной точностью с которой могут быть заданы параметры, вводимые в машину, а также неисправностями технических средств и т.д.

Перспективно сочетание ЭВМ и АВМ, т.е. использование гибридных средств вычислительной техники – гибридных вычислительных комплексов (ГВК), что в ряде случаев значительно ускоряет процесс исследования.

В ГВК удается сочетать высокую скорость функционирования аналоговых средств и высокую точность расчетов на базе цифровых средств вычислительной техники. Одновременно удается за счет наличия цифровых устройств обеспечить контроль проведения операций. Опыт использования вычислительной техники в задачах моделирования показывает, что с усложнением объекта большую эффективность по скорости решения и по стоимости выполнения операций дает использование гибридной техники.

Конкретным техническим средством воплощения имитационной модели могут быть ЭВМ, АВМ и ГВК. Если использование аналоговой техники ускоряет получение конечных результатов, сохраняя некоторую наглядность протекания реального процесса, то применение средств цифровой техники позволяет осуществить контроль за реализацией модели, создать программы по обработке и хранению результатов моделирования, обеспечить эффективный диалог исследователя с моделью.

Можно выделить три основные группы блоков имитационной системы:

- блоки, характеризующие моделируемый процесс функционирования системы  $S$ ;
- блоки, отображающие внешнюю среду  $E$  и ее воздействие на реализуемый процесс;
- блоки, играющие служебную вспомогательную роль, обеспечивая взаимодействие первых двух, а также выполняющие дополнительные функции по получению и обработке результатов моделирования.

Кроме того, имитационная система характеризуется набором переменных, с помощью которых удается управлять изучаемым процессом, и набором начальных условий, когда можно изменять условия проведения машинного эксперимента.

Таким образом, имитационная система есть средство проведения машинного эксперимента, причем эксперимент может ставиться многократно, заранее планироваться, могут определяться условия его проведения.

Необходимо при этом выбрать методику оценки адекватности получаемых результатов и автоматизировать как процессы получения, так и процессы обработки результатов в ходе машинного эксперимента.

## 2. Обеспечение моделирования

Эксперимент с имитационной моделью требует серьезной подготовки, поэтому имитационная система характеризуется наличием ряда видов обеспечения.

### 1) Математическое обеспечение.

Математическое обеспечение имитационной системы включает в себя совокупность математических соотношений, описывающих поведение реального объекта, совокупность алгоритмов, обеспечивающих как подготовку, так и работу с моделью. Сюда могут быть отнесены алгоритмы ввода исходных данных, имитации, вывода, обработки.

### 2) Программное обеспечение.

Программное обеспечение по своему содержанию включает в себя совокупность программ: планирования эксперимента, имитационной модели, проведения эксперимента, обработки и интерпретации результатов. Кроме того, программное обеспечение имитационной системы должно обеспечивать синхронизацию процессов в модели, т.е. необходим блок, организующий псевдопараллельное выполнение процессов в модели.

### 3) Информационное обеспечение.

Машинные эксперименты с имитационными моделями не могут проходить без хорошо разработанного и реализованного информационного обеспечения.

Информационное обеспечение включает в себя средства и технологию организации и реорганизации базы данных моделирования, методы логической и физической организации массивов, формы документов, описывающих процесс моделирования и его результаты.

Информационное обеспечение имитационной системы является наименее разработанной частью, поскольку только в настоящее время наблюдается переход к созданию сложных имитационных моделей и разрабатывается методология их использования при анализе и синтезе сложных систем с использованием концепции базы данных и знаний.

#### 4) Техническое обеспечение.

Техническое обеспечение имитационной системы включает в себя, прежде всего, средства вычислительной техники, связи и обмена между оператором и сетью ЭВМ, ввода и вывода информации, управления проведением эксперимента. К техническому обеспечению предъявляются весьма серьезные требования по надежности функционирования, так как сбои и отказы технических средств, ошибки оператора ЭВМ могут резко увеличить время работы с имитационной моделью и даже привести к неверным конечным результатам.

#### 5) Эргономическое обеспечение.

Эргономическое обеспечение имитационной системы представляет собой совокупность научных и прикладных методик и методов, а также нормативно-технических и организационно-методических документов, используемых на всех этапах взаимодействия человека-экспериментатора с инструментальными средствами (ЭВМ, гибридными комплексами и т.д.). Эти документы, используемые на всех стадиях разработки и эксплуатации имитационных систем и их элементов, предназначены для формирования и поддержания эргономического качества путем обоснования и выбора организационно-проектных решений, которые создают оптимальные условия для высокоэффективной деятельности человека во взаимодействии с моделирующим комплексом.

Для моделирования систем необходимы еще лингвистическое, организационное и другие виды обеспечения.

Таким образом, имитационная система:

- может рассматриваться как машинный аналог сложного реального процесса;
- позволяет заменить эксперимент с реальным процессом функционирования системы экспериментом с математической моделью этого процесса в ЭВМ.

В настоящее время имитационные эксперименты широко используют в практике проектирования сложных систем, когда реальный эксперимент невозможен.

### 3Э Эффективность моделирования систем на вычислительных машинах

#### *Возможности машинного моделирования.*

Несмотря на то, что имитационное моделирование на ЭВМ является мощным инструментом исследования систем, его применение рационально не во всех случаях. Известно множество задач, решаемых более эффективно другими методами.

Вместе с тем для большого класса задач исследования и проектирования систем метод имитационного моделирования наиболее приемлем. Правильное его употребление возможно лишь в случае четкого понимания сущности метода имитационного моделирования и условий его использования в практике исследования реальных систем при учете особенностей конкретных систем и возможностей их исследования различными методами.

В качестве основных критериев целесообразности применения метода имитационного моделирования на ЭВМ можно указать следующие:

- отсутствие или неприемлемость аналитических, численных и качественных методов решения поставленной задачи;
- наличие достаточного количества исходной информации о моделируемой системе  $S$  для обеспечения возможности построения адекватной имитационной модели;
- необходимость проведения на базе других возможных методов решения очень большого количества вычислений, трудно реализуемых даже с использованием ЭВМ;
- возможность поиска оптимального варианта системы при ее моделировании на ЭВМ.

Имитационное моделирование на ЭВМ, как и любой метод исследований, имеет достоинства и недостатки, проявляющиеся в конкретных приложениях.

К числу основных достоинств метода имитационного моделирования при исследовании сложных систем можно отнести следующие:

- машинный эксперимент с имитационной моделью дает возможность исследовать особенности процесса функционирования системы  $S$  в любых условиях;
- применение ЭВМ в имитационном эксперименте существенно сокращает продолжительность испытаний по сравнению с натурным экспериментом;
- имитационная модель позволяет включать результаты натурных испытаний реальной системы или ее частей для проведения дальнейших исследований;
- имитационная модель обладает известной гибкостью варьирования структуры, алгоритмов и параметров моделируемой системы, что важно с точки зрения поиска оптимального варианта системы;
- имитационное моделирование сложных систем часто является единственным практически реализуемым методом исследования процесса функционирования таких систем на этапе их проектирования.

Основным недостатком, проявляющимся при машинной реализации метода имитационного моделирования, является то, что решение, полученное при анализе имитационной модели  $M$ , всегда носит частный характер, так как оно соответствует фиксированным элементам структуры, алгоритмам поведения и значениям параметров системы  $S$ , начальных условий и воздействий внешней среды  $E$ .

Поэтому для полного анализа характеристик процесса функционирования систем, а не получения только отдельной точки приходится многократно воспроизводить имитационный эксперимент, варьируя исходные данные задачи. При этом, как следствие, возникает увеличение затрат машинного времени на проведение эксперимента с имитационной моделью процесса функционирования исследуемой системы  $S$ .

#### *Эффективность машинного моделирования.*

При имитационном моделировании, так же как и при любом другом методе анализа и синтеза системы  $S$ , весьма существен вопрос его эффективности.

Эффективность имитационного моделирования может оцениваться рядом критериев, в том числе:

- точностью и достоверностью результатов моделирования;
- временем построения и работы с моделью  $M$ ;
- затратами машинных ресурсов (времени и памяти);
- стоимостью разработки и эксплуатации модели.

Очевидно, наилучшей оценкой эффективности является сравнение получаемых результатов с реальным исследованием, т.е. с моделированием на реальном объекте при проведении натурного эксперимента. Поскольку это не всегда удается сделать, статистический подход позволяет с определенной степенью точности при повторяемости машинного эксперимента получить какие-то усредненные характеристики поведения системы.

Существенное влияние на точность моделирования оказывает число реализаций, и в зависимости от требуемой достоверности можно оценить необходимое число реализаций воспроизводимого случайного процесса.

Существенным показателем эффективности являются затраты машинного времени. В связи с использованием ЭВМ различного типа суммарные затраты складываются из:

- времени по вводу и выводу данных по каждому алгоритму моделирования;
- времени на проведение вычислительных операций, с учетом обращения к оперативной памяти и внешним устройствам;
- сложности каждого моделирующего алгоритма.

Расчеты затрат машинного времени являются приближенными и могут уточняться по мере отладки программ и накопления опыта у исследователя при работе с имитационной моделью.

Большое влияние на затраты машинного времени при проведении имитационных экспериментов оказывает рациональное планирование таких экспериментов. Определенное влияние на затраты машинного времени могут оказывать процедуры обработки результатов моделирования, а также форма их представления.

Построение имитационных моделей больших систем и проведение машинных экспериментов с этими моделями представляют собой достаточно трудоемкий процесс, в котором в настоящее время много неизученного. Однако специалисты в области проектирования, исследования и эксплуатации больших систем должны в совершенстве знать методологию машинного моделирования, сложившуюся к настоящему времени, чтобы быть готовыми к появлению ЭВМ следующих поколений, которые позволят сделать еще один существенный шаг в автоматизации построения моделей и использования имитационного моделирования систем.

#### **1.4. Тема 4: Классификация видов моделирования систем. Классификационные признаки. Классификация видов моделирования систем (2 часа).**

##### **1.4.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:**

Классификация видов моделирования систем  $S$  осуществляется по ряду признаков.

По признаку классификации № 1 – степень полноты – модели можно разделить на:

- полные, в основе лежит полное подобие, которое проявляется как во времени, так и в пространстве;
- неполные, характерно неполное подобие модели изучаемому объекту;
- приближенные, в основе лежит приближенное подобие, при котором некоторые стороны функционирования реального объекта не моделируются совсем.

В зависимости от признака № 2 – характер изучаемых процессов в системе  $S$  – все виды моделирования могут быть разделены на:

1) Детерминированные. Детерминированное моделирование отображает детерминированные процессы, т.е. процессы, в которых предполагается отсутствие всяких случайных воздействий.

2) Стохастические. Стохастическое моделирование отображает вероятностные процессы и события. В этом случае анализируется ряд реализаций случайного процесса, и оцениваются средние характеристики, т.е. набор однородных реализаций.

3) Статические. Статическое моделирование служит для описания поведения объекта в какой-либо момент времени.

4) Динамические. Динамическое моделирование отражает поведение объекта во времени.

5) Дискретные. Дискретное моделирование служит для описания процессов, которые предполагаются дискретными.

6) Непрерывные. Непрерывное моделирование позволяет отразить непрерывные процессы в системах.

7) Дискретно-непрерывные. Дискретно-непрерывное моделирование используется для случаев, когда хотят выделить наличие как дискретных, так и не-

прерывных процессов.

В зависимости от признака № 3 – формы представления объекта (системы S) – можно выделить мысленное иреальное моделирование.

8) Мысленное моделирование часто является единственным способом моделирования объектов, которые либо практически нереализуемы в заданном интервале времени, либо существуют вне условий, возможных для их физического создания. Например, на базе мысленного моделирования могут быть проанализированы многие ситуации микромира, которые не поддаются физическому эксперименту.

Мысленное моделирование может быть реализовано в виде:

- наглядного моделирования;
- символического моделирования;
- математического моделирования.

При наглядном моделировании на базе представлений человека о реальных объектах создаются различные наглядные модели, отображающие явления и процессы, протекающие в объекте. Наглядное моделирование подразделяется на гипотетическое, аналоговое и макетирование.

В основу гипотетического моделирования исследователем закладывается некоторая гипотеза о закономерностях протекания процесса в реальном объекте, которая отражает уровень знаний исследователя об объекте и базируется на причинно-следственных связях между входом и выходом изучаемого объекта. Гипотетическое моделирование используется, когда знаний об объекте недостаточно для построения формальных моделей.

Аналоговое моделирование основывается на применении аналогий различных уровней. Наивысшим уровнем является полная аналогия, имеющая место только для достаточно простых объектов. С усложнением объекта используют аналогии последующих уровней, когда аналоговая модель отображает несколько либо только одну сторону функционирования объекта.

Символическое моделирование представляет собой искусственный процесс создания логического объекта, который замещает реальный и выражает основные свойства его отношений с помощью определенной системы знаков или символов.

Разновидностью символического моделирования является языковое моделирование. В основе языкового моделирования лежит некоторый тезаурус. Тезаурус – словарь, который очищен от неоднозначности, т.е. в нем каждому слову может соответствовать лишь единственное понятие, хотя в обычном словаре одному слову могут соответствовать несколько понятий.

Для исследования характеристик процесса функционирования любой системы S математическими методами, включая и машинные, должна быть проведена формализация этого процесса, т.е. построена математическая модель.

Под математическим моделированием будем понимать процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью, и исследование этой модели, позволяющее получать характеристики рассматриваемого реального объекта.

Математическое моделирование для исследования характеристик процесса функционирования систем можно разделить на аналитическое, комбинированное и имитационное.

Для аналитического моделирования характерно то, что процессы функционирования элементов системы записываются в виде некоторых функциональных соотношений (алгебраических, интегро-дифференциальных, конечно-разностных и т.п.) или логических условий. Аналитическая модель может быть исследована следующими методами:

а) аналитическим, когда стремятся получить в общем виде явные зависимости для искомых характеристик;

б) численным, когда, не умея решать уравнений в общем виде, стремятся получить числовые результаты при конкретных начальных данных;

в) качественным, когда, не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения (например, оценить устойчивость решения).

Наиболее полное исследование процесса функционирования системы можно провести, если известны явные зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными системы  $S$ . Однако такие зависимости удается получить только для сравнительно простых систем.

При усложнении систем исследование их аналитическим методом наталкивается на значительные трудности, которые часто бывают непреодолимыми. Поэтому, желая использовать аналитический метод, в этом случае идут на существенное упрощение первоначальной модели, чтобы иметь возможность изучить хотя бы общие свойства системы. Такое исследование на упрощенной модели аналитическим методом помогает получить ориентировочные результаты для определения более точных оценок другими методами.

Численный метод позволяет исследовать по сравнению с аналитическим методом более широкий класс систем, но при этом полученные решения носят частный характер. Численный метод особенно эффективен при использовании ЭВМ.

В отдельных случаях исследования системы могут удовлетворить и те выводы, которые можно сделать при использовании качественного метода анализа математической модели. Такие качественные методы широко используются, например, в теории автоматического управления для оценки эффективности различных вариантов систем управления.

При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы  $S$  во времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы  $S$ . Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия и др., которые часто создают трудности при аналитических исследованиях. В настоящее время имитационное моделирование – наиболее эффективный метод исследования больших систем, а часто и единственный практически доступный метод получения информации о поведении системы, особенно на этапе ее проектирования.

Когда результаты, полученные при воспроизведении на имитационной модели процесса функционирования системы  $S$ , являются реализациями случайных величин и функций, тогда для нахождения характеристик процесса требуется его многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой информации и целесообразно в качестве метода машинной реализации имитационной модели использовать метод статистического моделирования.

Первоначально был разработан метод статистических испытаний, представляющий собой численный метод, который применялся для моделирования случайных величин и функций, вероятностные характеристики которых совпадали с решениями аналитических задач (такая процедура получила название метода Монте-Карло). Затем этот прием стали применять и для машинной имитации с целью исследования характеристик процессов функционирования систем, подверженных случайным воздействиям, т. е. появился метод статистического моделирования.

Таким образом, методом статистического моделирования будем в дальнейшем называть метод машинной реализации имитационной модели, а методом статистических

испытаний (Монте-Карло) – численный, метод решения аналитической задачи.

Метод имитационного моделирования позволяет решать задачи анализа больших систем S, включая задачи оценки: вариантов структуры системы, эффективности различных алгоритмов управления системой, влияния изменения различных параметров системы. Имитационное моделирование может быть положено также в основу структурного, алгоритмического и параметрического синтеза больших систем, когда требуется создать систему, с заданными характеристиками при определенных ограничениях, которая является оптимальной по некоторым критериям оценки эффективности.

Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование при анализе и синтезе систем позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования. При построении комбинированных моделей проводится предварительная декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие под процессы и для тех из них, где это, возможно, используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели. Такой комбинированный подход позволяет охватить качественно новые классы систем, которые не могут быть исследованы с использованием только аналитического и имитационного моделирования в отдельности.

9) Реальное моделирование. При реальном моделировании используется возможность исследования различных характеристик либо на реальном объекте целиком, либо на его части. Такие исследования могут проводиться как на объектах, работающих в нормальных режимах, так и при организации специальных режимов для оценки интересующих исследователя характеристик (при других значениях переменных и параметров, в другом масштабе времени и т.д.).

Реальное моделирование является наиболее адекватным, но при этом его возможности с учетом особенностей реальных объектов ограничены. Например, проведение реального моделирования АСУ предприятием потребует, во-первых, создания такой АСУ, а во-вторых, проведения экспериментов с управляемым объектом, т.е. предприятием, что в большинстве случаев невозможно. Разновидностями реального моделирования являются натурное и физическое моделирование.

Натурным моделированием называют проведение исследования на реальном объекте с последующей обработкой результатов эксперимента на основе теории подобия.

При функционировании объекта в соответствии с поставленной целью удается выявить закономерности протекания реального процесса. Надо отметить, что такие разновидности натурного эксперимента, как производственный эксперимент и комплексные испытания, обладают высокой степенью достоверности.

Натурное моделирование подразделяется на:

- натурный эксперимент;
- комплексные испытания;
- производственный эксперимент.

Натурный эксперимент. С развитием техники и проникновением в глубь процессов, протекающих в реальных системах, возрастает техническая оснащенность современного научного эксперимента. Он характеризуется широким использованием средств автоматизации проведения, применением весьма разнообразных средств обработки информации, возможностью вмешательства человека в процесс проведения эксперимента, и в соответствии с этим появилось новое научное направление – автоматизация научных экспериментов.

Отличие эксперимента от реального протекания процесса заключается в том, что в нем могут появиться отдельные критические ситуации и определяться границы устойчивости процесса. В ходе эксперимента вводятся новые факторы и возмущающие воздействия в процессе функционирования объекта.

Комплексные испытания можно отнести к натуральному моделированию, когда

вследствие повторения испытаний изделий выявляются общие закономерности о надежности этих изделий, о характеристиках качества и т.д. В этом случае моделирование осуществляется путем обработки и обобщения сведений, проходящих в группе однородных явлений.

Производственный эксперимент. Наряду со специально организованными испытаниями возможна реализация натурного моделирования путем обобщения опыта, накопленного в ходе производственного процесса, т.е. можно говорить о производственном эксперименте. Здесь на базе теории подобия обрабатывают статистический материал по производственному процессу и получают его обобщенные характеристики.

Физическое моделирование отличается от натурного тем, что исследование проводится на установках, которые сохраняют природу явлений и обладают физическим подобием. В процессе физического моделирования задаются некоторые характеристики внешней среды и исследуется поведение либо реального объекта, либо его модели при заданных или создаваемых искусственно воздействиях внешней среды. Физическое моделирование может протекать в масштабе реального, нереального времени и без учета времени

С точки зрения признака классификации № 4 – математического описания объекта – и в зависимости от его характера модели можно разделить на:

- аналоговые (непрерывные);
- цифровые (дискретные);
- аналого-цифровые (комбинированные).

Под аналоговой моделью понимается модель, которая описывается уравнениями, связывающими непрерывные величины.

Под цифровой понимают модель, которая описывается уравнениями, связывающими дискретные величины, представленные в цифровом виде.

Под аналого-цифровой понимается модель, которая может быть описана уравнениями, связывающими непрерывные и дискретные величины.

Особое место в моделировании занимает кибернетическое моделирование, в котором отсутствует непосредственное подобие физических процессов, происходящих в моделях, реальным процессам. В этом случае стремятся отобразить лишь некоторую функцию и рассматривают реальный объект как «черный ящик», имеющий ряд входов и выходов, и моделируют некоторые связи между выходами и входами. Чаще всего при использовании кибернетических моделей проводят анализ поведенческой стороны объекта при различных воздействиях внешней среды.

Таким образом, в основе кибернетических моделей лежит отражение некоторых информационных процессов управления, что позволяет оценить поведение реального объекта. Для построения имитационной модели в этом случае необходимо выделить исследуемую функцию реального объекта, попытаться формализовать эту функцию в виде некоторых операторов связи между входом и выходом и воспроизвести на имитационной модели данную функцию, причем на базе совершенно иных математических соотношений и, естественно, иной физической реализации процесса.

## Раздел 2. Имитационное моделирование

**2.1. Тема 5:** Основы имитационного моделирования. Понятие имитационного моделирования. Технология и этапы имитационного моделирования. Виды имитационного моделирования (2 часа).

**2.1.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:**

## 1 Понятие имитационного моделирования

Имитационное моделирование (от англ. *simulation*) – это распространенная разновидность аналогового моделирования, реализуемого с помощью набора математических инструментальных средств, специальных имитирующих компьютерных программ и технологий программирования, позволяющих посредством процессов-аналогов провести целенаправленное исследование структуры и функций реального сложного процесса в памяти компьютера в режиме имитации, выполнить оптимизацию некоторых его параметров.

Имитационной моделью называется специальный программный комплекс, который позволяет имитировать деятельность какого-либо сложного объекта. Он запускает в компьютере параллельные взаимодействующие вычислительные процессы, которые являются по своим временным параметрам (с точностью до масштабов времени и пространства) аналогами исследуемых процессов.

Следует отметить, что любое моделирование имеет в своей методологической основе элементы имитации реальности с помощью какой-либо символики (математики) или аналогов. Поэтому иногда имитационным моделированием называют целенаправленные серии многовариантных расчетов, выполняемых на компьютере с применением математических моделей и методов. Однако с точки зрения компьютерных технологий, такое моделирование – это обычные вычисления, выполняемые с помощью расчетных программ или табличного процессора. Математические расчеты (в том числе табличные) можно производить и без ЭВМ: используя калькулятор, логарифмическую линейку, правила арифметических действий и вспомогательные таблицы. Но имитационное моделирование – это чисто компьютерная работа, которую невозможно выполнить подручными средствами. Поэтому часто для этого вида моделирования используется синоним компьютерное моделирование.

Имитационную модель нужно создавать. Для этого необходимо специальное программное обеспечение – система моделирования. Специфика такой системы определяется технологией работы, набором языковых средств, сервисных программ и приемов моделирования. Имитационная модель должна отражать большое число параметров, логику и закономерности поведения моделируемого объекта во времени (временная динамика) и в пространстве (пространственная динамика).

Таким образом, моделирование систем связано с понятием динамики этих систем.

С точки зрения специалиста (информатика-прикладника, математика-программиста и др.), имитационное моделирование контролируемого процесса или управляемого объекта – это высокоуровневая информационная технология, которая обеспечивает два вида действий, выполняемых с помощью компьютера:

- работы по созданию или модификации имитационной модели;
- эксплуатацию имитационной модели и интерпретацию результатов.

Имитационное (компьютерное) моделирование систем обычно применяется в двух случаях:

1) для управления сложным технологическим процессом, когда имитационная модель управляемой системы используется в качестве инструментального средства в контуре адаптивной системы управления, создаваемой на основе информационных (компьютерных) технологий;

2) при проведении экспериментов с дискретно-непрерывными моделями сложных информационных и человеко-машинных систем для получения и отслеживания их динамики в экстремальных ситуациях, связанных с рисками, натурное моделирование которых нежелательно или невозможно.

Можно выделить следующие типовые задачи, решаемые средствами имитационного моделирования при управлении информационными и человеко-машинными системами:

- моделирование динамических процессов, протекающих в системе, для

определения временных и других параметров;

- управление процессом достижения целей системы на различных этапах ее жизненного цикла с учетом возможных рисков и тактики выделения ресурсов;
- прогнозирование результатов функционирования системы на конкретный период времени (с анализом динамики показателей);
- анализ адаптивных свойств и живучести системы;
- оценка параметров надежности и задержек в централизованной информационной системе с коллективным доступом (например, с учетом несовершенства физической организации баз данных и отказов оборудования);
- анализ эксплуатационных параметров распределенной многоуровневой информационной управляющей системы с учетом неоднородной структуры, пропускной способности каналов связи и несовершенства физической организации распределенной базы данных в локальных центрах;
- анализ проектов замены и наладки оборудования с учетом возникновения неисправностей;
- моделирование действий аварийных служб сложной человеко-машинной системы;
- расчет параметров надежности и задержек обработки информации в системе.

Приведенный перечень является неполным и охватывает те примеры использования имитационных моделей, которые описаны в литературе или применялись на практике.

## 2 Технология и этапы имитационного моделирования

### *Технология имитационного моделирования.*

Имитационное моделирование реализуется посредством набора математических инструментальных средств, специальных компьютерных программ и приемов, позволяющих с помощью компьютера провести целенаправленное моделирование в режиме имитации структуры и функций сложного процесса, а также оптимизацию некоторых его параметров.

Набор программных средств и приемов моделирования определяет специфику системы моделирования – специального программного обеспечения.

В отличие от других видов и способов математического моделирования с применением ЭВМ, имитационное моделирование имеет свою специфику – запуск в компьютере взаимодействующих вычислительных процессов, которые являются по своим временными параметрам (с точностью до масштабов времени и пространства) аналогами исследуемых процессов.

### *Этапы имитационного моделирования.*

Имитационное моделирование как особая информационная технология предполагает проведение ряда основных этапов.

Этап № 1. Структурный анализ процессов. Проводится формализация структуры сложного реального процесса путем разложения его на подпроцессы, выполняющие определенные функции и имеющие взаимные функциональные связи согласно легенде, разработанной рабочей экспертной группой. Выявленные подпроцессы, в свою очередь, могут разделяться на другие функциональные подпроцессы.

Структура общего моделируемого процесса может быть представлена в виде графа, имеющего иерархическую многослойную структуру. В результате появляется формализованное изображение имитационной модели в графическом виде. Информационные процессы содержат подпроцессы, не имеющие физической основы и протекающие виртуально, так как оперируют с информацией, логикой, законами и их обработкой, поэтому структурный анализ является эффективным этапом при моделировании таких процессов. На этом этапе описываются экзогенные переменные, т.е. те переменные, которые задаются вне модели, т.е. известны заранее. Еще описываются

параметры – это коэффициенты уравнений модели. Часто их не разделяют. Эндогенные переменные – это те переменные, которые определяются в ходе расчетов по модели и не задаются в ней извне.

Этап № 2. Формализованное описание модели. Графическое изображение модели, функции, выполняемой каждым подпроцессом, условия взаимодействия всех подпроцессов и особенности поведения моделируемого процесса (временная и пространственная динамики должны быть описаны на специальном языке одним из способов):

- описание вручную на алгоритмическом языке, т.е. написание программы на языке программирования;
- автоматизированное описание с помощью компьютерного графического конструктора.

Этап № 3. Построение модели:

- обычно это трансляция и редактирование связей (сборка модели);
- режимы интерпретации и компиляция;
- верификация (калибровка) параметров, работа на тестовых примерах.

Этап № 4. Проведение модельного эксперимента. Проводится оптимизация определенных параметров реального процесса. Этому должен предшествовать процесс, который называется планированием эксперимента.

### 3 Виды имитационного моделирования

Различают следующие виды имитационного моделирования:

- системная динамика;
- дискретно-событийное моделирование;
- агентное моделирование.

Системная динамика – вид 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. Такой вид моделирования более всех других видов помогает понять суть происходящего выявления причинно-следственных связей между объектами и явлениями. С помощью системной динамики строят модели информационных и технологических процессов, развития и динамики системы. Метод основан Форрестером в 1950-х гг.

Дискретно-событийное моделирование – это подход к моделированию, предлагающий абстрагироваться от непрерывной природы событий и рассматривать только основные события моделируемой системы, такие как: «ожидание», «обработка», «хранение», «передача» и др.

Дискретно-событийное моделирование наиболее развито и имеет огромную сферу приложений – от систем массового обслуживания до транспортных и производственных систем. Этот вид моделирования наиболее подходит для моделирования производственных процессов. Подход основан Джоном Гордоном в 1960-х гг.

Агентное моделирование – это относительно новое (1990-е – 2000-е гг.) направление в имитационном моделировании, которое используется для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами (как в других видах моделирования), а наоборот, глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности агентов.

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

Цель агентных моделей – получить представление об этих глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении ее отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе.

## 2.2. Тема 6: Моделирование случайных процессов. Метод Монте-Карло. Иллюстрация метода Монте-Карло (2 часа).

### 2.2.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:

#### 1. Метод Монте-Карло

В вероятностных моделях смена состояний моделируемой системы определяется случайными величинами.

Событие называется случайным, если оно достоверно непредсказуемо. Случайность пронизывает наш мир и чаще всего играет отрицательную роль в нашей жизни. Однако есть обстоятельства, в которых случайность может оказаться полезной.

Одним из распространенных приближенных методов решения задач вычислительной математики является случайный метод, называемый *методом Монте-Карло*.

Сущность метода заключается в том, что для решения какой-либо математической задачи, связанной с вычислением числа  $I$ , строится некоторая случайная величина  $\xi$ , такая, что математическое ожидание этой случайной величины  $E(\xi)$  является значением искомого решения. Проведя серию вычислительных экспериментов со случайной величиной  $\xi$ , мы можем найти приближенное решение как среднее значение результатов эксперимента.

Создателями метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) считают американских математиков Д. Неймана и С. Улама. В 1944 г., в связи с работами по созданию атомной бомбы, Нейман предложил широко использовать аппарат теории вероятностей для решения прикладных задач с помощью ЭВМ. Данный метод был назван так в честь города в округе Монако, из-за рулетки, простейшего генератора случайных чисел.

Первоначально метод Монте-Карло использовался главным образом для решения задач нейтронной физики, где традиционные численные методы оказались малопригодными. Далее его влияние распространилось на широкий класс задач статистической физики, очень разных по своему содержанию.

К разделам науки, где все в большей мере используется метод Монте-Карло, следует отнести:

- задачи теории массового обслуживания;
- задачи теории игр и математической экономики;
- задачи теории передачи сообщений при наличии помех и ряд других.

*Метод Монте-Карло* (или метод статистических испытаний) можно определить, как метод моделирования случайных величин с целью вычисления характеристик их распределений.

Суть состоит в том, что результат испытаний зависит от некоторой случайной величины, распределенной по заданному закону. Поэтому результат каждого отдельного испытания носит случайный характер. Как правило, составляется программа для осуществления одного случайного испытания. Проведя серию испытаний, получают выборку. Полученные статистические данные обрабатываются и представляются в виде численных оценок интересующих исследователя величин (характеристик системы).

Испытание повторяется  $N$  раз, причем каждый опыт не зависит от остальных, и результаты всех опытов усредняются. Это значит, что число испытаний должно быть достаточно велико, поэтому метод существенно опирается на возможности компьютера.

Теоретической основой метода Монте-Карло являются предельные теоремы теории вероятностей. Они гарантируют высокое качество статистических оценок при весьма большом числе испытаний. Метод статистических испытаний применим для исследования как стохастических, так и детерминированных систем.

## 2. Иллюстрация метода Монте-Карло

Пусть требуется определить площадь круга известного диаметра с помощью выборок из значений случайной величины. Впишем круг в квадрат; таким образом, стороны квадрата будут равны диаметру круга. Разобьем далее квадрат на единичные квадраты (каждый площадью 1).

Разумеется, можно найти площадь круга подсчетом числа единичных квадратов (или их частей), попавших внутрь круга. Однако наша цель состоит в использовании выборок, поскольку при моделировании информацию можно получать лишь таким образом. Чтобы объяснить, как это делается, рассмотрим конкретный численный пример.

Пусть круг имеет радиус  $r = 5$  см и его центр в точке (1; 2). Уравнение окружности будет иметь вид:

$$(x - 1)^2 + (y - 2)^2 = 25.$$

Квадрат определяется его вершинами (-4; -3), (6; -3), (-4; 7) и (6; 7). Любая точка  $(x, y)$  внутри квадрата или на его границе должна удовлетворять неравенствам

$$-4 \leq x \leq 6 \quad \text{и} \quad -3 \leq y \leq 7.$$

Применение выборок при использовании метода Монте-Карло основано на предположении, что все точки в квадрате могут появляться с одинаковой вероятностью, т.е.  $x$  и  $y$  распределены равномерно с плотностями вероятности

$$f(x) = \begin{cases} 1/10, & \text{при } -4 \leq x \leq 6, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$f(y) = \begin{cases} 1/10, & \text{при } -3 \leq y \leq 7, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Подсчитаем число точек, попавших внутрь круга или на окружность. Предположим, что выборка состоит из  $n$  наблюдений и  $m$  из  $n$  точек попали внутрь круга или на окружность. Тогда  $S_{\text{круга}} = m/n$ ,  $S_{\text{квадрата}} = m/n (10 \times 10) = 100 m/n$ .

Подобный способ оценивания площади круга можно обосновать тем, что в процессе получения выборки любая точка  $(x, y)$  может с одинаковой вероятностью попасть в любое место квадрата. Поэтому отношение  $m/n$  представляет оценку площади круга относительно площади квадрата.

В целях изучения влияния статистической ошибки при моделировании задача решалась для различных значений  $n$ , равных 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 и 10000. Кроме того, при каждом  $n$  было проведено 10 прогонов, в каждом из которых использовались различные последовательности случайных чисел из интервала (0,1).

Точное значение площади равно  $78,54 \text{ см}^2$ .

С ростом числа генерируемых точек (продолжительности прогона модели) оценки площади круга приближаются к точному значению ( $78,54 \text{ см}^2$ ).

Сначала оценки колеблются около точного значения, а затем стабилизируются. Это условие обычно достигается после повторения эксперимента достаточное количество раз.

Наблюдаемое явление типично для результатов любой имитационной модели. Обычно в большинстве имитационных моделей нас интересуют результаты, полученные в стационарных условиях.

При возрастании  $n$  от 100 до 200 дисперсия резко уменьшается с 18,3 до 3,5. За исключением этого интервала, столь резкого уменьшения дисперсии нигде больше не наблюдается.

Кроме того, существует предел, за которым увеличение продолжительности прогона модели уже не дает существенного повышения точности результата, измеряемой дисперсией.

Это замечание очень важно, поскольку затраты на эксплуатацию имитационной

модели прямо пропорциональны продолжительности прогонов. Поэтому желательно найти компромисс между большой точностью (т.е. малой дисперсией) и небольшими затратами на процедуру получения результатов.

**2.3. Тема 7:**Статистическое моделирование систем на ЭВМ. Понятие статистического моделирования и датчики случайных чисел. Имитация случайных событий при имитационных экспериментах со стохастическими системами (2 часа).

### 2.3.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:

#### 1. Понятие статистического моделирования и датчики случайных чисел

В практике моделирования систем информатики наиболее часто приходится иметь дело с объектами, которые в процессе своего функционирования содержат элементы стохастичности или подвергаются стохастическим воздействиям внешней среды.

Поэтому основным методом получения результатов с помощью имитационных моделей таких стохастических систем является *метод статистического моделирования на ЭВМ*, использующий в качестве теоретической базы предельные теоремы теории вероятностей.

Возможность получения пользователем модели результатов статистического моделирования сложных систем в условиях ограниченности машинных ресурсов существенно зависит от эффективности процедур генерации псевдослучайных последовательностей на ЭВМ, положенных в основу имитации воздействий на элементы моделируемой системы.

На ЭВМ невозможно получить идеальную последовательность случайных чисел хотя бы потому, что на ней можно оперировать только с конечным множеством чисел. Кроме того, для получения значений  $x$  случайной величины  $f$  используются формулы (алгоритмы). Поэтому такие последовательности, являющиеся по своей сути детерминированными, называются *псевдослучайными*.

Прежде чем перейти к описанию конкретных алгоритмов получения на ЭВМ последовательностей псевдослучайных чисел, сформулируем *набор требований*, которым должен удовлетворять *идеальный генератор*.

Полученные с помощью идеального генератора псевдослучайные последовательности чисел должны:

- состоять из квазиравномерно распределенных чисел;
- содержать статистически независимые числа;
- быть воспроизводимыми;
- иметь неповторяющиеся числа;
- получаться с минимальными затратами машинного времени;
- занимать минимальный объем машинной памяти.

Наибольшее применение в практике моделирования на ЭВМ для генерации последовательностей псевдослучайных чисел находят алгоритмы вида

$$X_i + 1 = \Phi(x_i) \quad (1)$$

представляющие собой рекуррентные соотношения первого порядка, для которых начальное число  $x_0$  и постоянные параметры заданы.

Например, легко показать, что функция вида (1), не может породить хорошую последовательность псевдослучайных чисел  $x_1, x_2, \dots$

Действительно, если построить точки с координатами  $(x_1, x_2), (x_3, x_4)$  по случайным числам, полученная случайными числами, то они будут равномерно распределены в единичном квадрате  $0 \leq x_i \leq 1, 0 \leq x_i + 1 \leq 1$ .

Соответствующие же точки, построенные по числам  $(x_1, \Phi(x_2)), (x_3, \Phi(x_4)), \dots$

располагаются в площади, ограниченной кривой  $x_i + 1 = \Phi(x_i)$ .

Хорошую последовательность случайных чисел может породить только такая функция  $x_i + 1 = \Phi(x_i)$ , график которой достаточно плотно заполняет единичный квадрат.

Примером такой функции при больших целых положительных  $A$  может служить

$$x_i + 1 = D(Ax_i),$$

где  $D(u) = u - \lfloor u \rfloor$  – дробная часть числа  $u$ ;

$\lfloor u \rfloor$  – целая часть числа  $u$ , то есть наибольшее целое число, не превосходящее  $u$ .

Пусть для примера  $A = 10$ , тогда функция  $x_i + 1 = \Phi(x_i)$  будет иметь другой вид, приведенные условия являются только необходимыми, но не достаточными для того, чтобы соотношение (1) порождало хорошие последовательности псевдослучайных чисел.

## 2. Имитация случайных событий при имитационных экспериментах со стохастическими системами

Статистическое моделирование системы – один из основных методов, учитывающий стохастические воздействия.

Количество случайных чисел, используемых для получения статистически устойчивой оценки характеристики процесса функционирования системы  $S$ , при реализации моделирующего алгоритма на ЭВМ, колеблется в достаточно широких пределах в зависимости от класса объекта моделирования, вида оцениваемых характеристик, необходимой точности и достоверности результатов моделирования.

Для метода статистического моделирования на ЭВМ характерно, что большое число операций, а соответственно и большая доля машинного времени расходуются на действия со случайными числами.

Кроме того, результаты статистического моделирования существенно зависят от качества исходных (базовых) последовательностей случайных чисел. Поэтому наличие простых и экономичных способов формирования, последовательностей случайных чисел требуемого качества во многом определяет возможность практического использования машинного моделирования систем.

Рассмотрим возможности и особенности получения последовательностей случайных чисел при статистическом моделировании систем на ЭВМ.

На практике используются три основных способа генерации случайных чисел:

- аппаратный (физический);
- табличный (файловый) и алгоритмический (программный).

### *Аппаратный способ*

При этом способе генерации случайные числарабатываются специальной электронной приставкой – *генератором (датчиком) случайных чисел*, – служащей в качестве одного из внешних устройств ЭВМ.

Таким образом, реализация этого способа генерации не требует дополнительных вычислительных операций ЭВМ по выработке случайных чисел, а необходима только операция обращения к внешнему устройству (датчику).

В качестве физического эффекта, лежащего в основе таких генераторов чисел, чаще всего используются шумы в электронных и полупроводниковых приборах, явления распада радиоактивных элементов и т.д.

Возможны и другие схемные решения аппаратных генераторов случайных чисел. Однако аппаратный способ получения случайных чисел не позволяет гарантировать качество последовательности непосредственно во время моделирования системы  $S$  на ЭВМ.

### *Табличный способ*

Если случайные числа, оформленные в виде таблицы, помещать во внешнюю или оперативную память ЭВМ, предварительно сформировав из них соответствующий файл (массив чисел), то такой способ будет называться *табличным*.

Однако этот способ получения случайных чисел при моделировании систем на ЭВМ обычно рационально использовать при сравнительно небольшом объеме таблицы и соответственно файла чисел, когда для хранения можно применять оперативную память.

Хранение файла во внешней памяти при частном обращении в процессе статистического моделирования не рационально, так как вызывает увеличение затрат машинного времени при моделировании системы S из-за необходимости обращения к внешнему накопителю.

Возможны промежуточные способы организации файла, когда он переписывается в оперативную память периодически по частям. Это уменьшает время на обращение к внешней памяти, но сокращает объем оперативной памяти, который можно использовать для моделирования процесса функционирования системы S.

#### *Алгоритмический способ*

Способ получения последовательностей случайных чисел основан на формировании случайных чисел в ЭВМ с помощью специальных алгоритмов и реализующих программ.

Каждое случайное число вычисляется с помощью соответствующей программы по мере возникновения потребностей при моделировании системы на ЭВМ.

**2.4. Тема 8:** Вычисление интегралов по методу Монте-Карло. Применение метода Монте-Карло для вычисления интегралов. Интегрирование одномерных интегралов. Решение примеров вычисления интегралов по методу Монте-Карло (4 часа).

#### **2.4.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:**

##### **1. Применение метода Монте-Карло для вычисления интегралов**

Во многих задачах исходные данные носят случайный характер, поэтому для их решения должен применяться статистико-вероятностный подход. На основе таких подходов построен ряд численных методов, которые учитывают случайный характер вычисляемых или измеряемых величин.

К ним принадлежит и метод статистических испытаний, называемый также методом Монте-Карло, который применяется к решению некоторых задач вычислительной математики, в том числе и для вычисления интегралов.

Метод Монте-Карло состоит в том, что рассматривается некоторая случайная величина  $\xi$ , математическое ожидание которой равно искомой величине  $x$ :

$$\xi = \frac{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n}{n} \approx x.$$

Проводится серия  $n$  независимых испытаний, в результате которых получается (генерируется) последовательность  $n$  случайных чисел  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ , и по совокупности этих значений приближенно определяется искомая величина

$$M_{\xi} = M \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i \right) = \frac{1}{n} M \sum_{i=1}^n \xi_i = \frac{nx}{n} = x.$$

##### **2 Интегрирование одномерных интегралов**

Интегрирование одномерных определенных интегралов методом Монте-Карло производится по изложенному ниже алгоритму

$$I = \int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i),$$

где  $x_i$  – равномерно распределенная случайная величина;

$f(x)$  – подынтегральная функция;

$n$  – количество случайных аргументов  $x_i$ ;

$b$  и  $a$  – верхний и нижний пределы интегрирования.

Для решения задач методом Монте-Карло необходимо составить программу с использованием этой функции.

### 3. Решение примеров вычисления интегралов по методу Монте-Карло

Составьте программу и практически решите следующие примеры.

Пример 1. Вычислить методом Монте-Карло приведенный следующий интеграл

$$\int_0^2 \frac{\sqrt[5]{x^3 + 2x + 8}}{\sqrt[3]{x^5 + 3x^4 + 8x + 9}} dx$$

Решение

Ниже приведено решение численным методом и методом Монте-Карло. Эти решения необходимо выполнить и проанализировать ход решения и сформулировать выводы.

Выберем  $N=1000000$

```
W := | y ← 0
      | for i ∈ 1..N
      |   x ← md(2)
      |   y ← y +  $\frac{\sqrt[5]{x^3 + 2 \cdot x + 8}}{\sqrt[3]{x^5 + 3 \cdot x^4 + 8 \cdot x + 9}}$ 
      | W ←  $\frac{y \cdot 2}{N}$ 
```

Ответ:  $W=1,142$ .

Пример 2. Вычислить методом Монте-Карло интеграл

$$y = \int_{-3}^{10} (x^2 + 3x + 8) dx$$

Задача отличается от предыдущей тем, что нижний предел не равен нулю, а функция  $rnd(x)$  вычисляет случайные числа в пределах  $0 - x$ . Поэтому здесь вычисляются два интеграла.

Решение

Выбираем  $m=1000000$ .

```
y1 := | y2 ← 0
      | y3 ← 0
      | for i ∈ 0..m
      |   | x1 ← md(10)
      |   | y2 ← y2 + (x12 + 3·x1 + 8)
      |   | x2 ← md(-3)
      |   | y3 ← y3 + (x22 + 3·x2 + 8)
      |   | i
      |   | y2 ←  $\frac{10 \cdot y2}{m}$ 
      |   | y3 ←  $\frac{3 \cdot y3}{m}$ 
      |   | y1 ← y2 + y3
      |   | y1
```

Ответ:  $Y1=582,833$ .

**2.5. Тема 9:** Задачи теории массового обслуживания. Понятие о задачах теории массового обслуживания. Примеры систем и сетей массового обслуживания (2 часа).

### 2.5.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:

#### 1. Понятие о задачах теории массового обслуживания

Многие организации и системы, которые работают с клиентами, можно достаточно точно описать с помощью совокупности математических методов и моделей, которые получили название *теории массового обслуживания* (ТМО).

С позиции моделирования процесса массового обслуживания ситуации, когда образуются очереди заявок (требований) на обслуживание, возникают следующим образом.

Поступив в обслуживающую систему, требование присоединяется к очереди других (ранее поступивших) требований. Канал обслуживания выбирает требование из находящихся в очереди, с тем, чтобы приступить к его обслуживанию. После завершения процедуры обслуживания очередного требования канал обслуживания приступает к обслуживанию следующего требования, если таковое имеется в блоке ожидания.

Цикл функционирования системы массового обслуживания подобного рода повторяется многократно в течение всего периода работы обслуживающей системы. При этом предполагается, что переход системы на обслуживание очередного требования после завершения обслуживания предыдущего требования происходит мгновенно, в случайные моменты времени.

Очереди возникают практически во всех системах массового обслуживания (СМО) и теория массового обслуживания (теория очередей) занимается оценкой функционирования системы при заданных параметрах и поиском параметров, оптимальных по некоторым критериям.

Эта теория представляет особый раздел теории случайных процессов и

использует, в основном, аппарат теории вероятностей.

Первые публикации в этой области относятся к 20-м годам XX века и принадлежат датчанину А. Эрлангу, занимавшемуся исследованиями функционирования телефонных станций – типичных СМО, где случайны моменты вызова, факт занятости абонента или всех каналов, продолжительность разговора. В дальнейшем теория очередей нашла развитие в работах К. Пальма, Ф. Поллачека, А.Я. Хинчина, Б.В. Гнеденко, А. Кофмана, Р. Крюона, Т. Саати и других отечественных и зарубежных математиков.

В качестве основных элементов СМО следует выделить входной поток заявок, очередь на обслуживание, систему (механизм) обслуживания и выходящий поток заявок (рисунок 1).



Рисунок 1 – Пример схемы СМО

В роли заявок (требований, вызовов) могут выступать покупатели в магазине, телефонные вызовы, поезда при подходе к железнодорожному узлу, вагоны под разгрузкой, автомашины на станции техобслуживания, самолеты в ожидании разрешения на взлет, штабель бревен при погрузке на автотранспорт. Роль обслуживающих приборов (каналов, линий) играют продавцы или кассиры в магазине, таможенники, пожарные машины, взлетно-посадочные полосы, экзаменаторы, ремонтные бригады.

В зависимости от характеристик этих элементов СМО классифицируются следующим образом.

*По характеру поступления заявок.* Если интенсивность входного потока (количество заявок в единицу времени) постоянна или является заданной функцией от времени, поток называют регулярным. Если параметры потока независимы от конкретного момента времени, поток называют стационарным.

*По количеству одновременно поступающих заявок.* Поток с вероятностью одновременного появления двух и более заявок равной нулю называется ординарным.

*По связи между заявками.* Если вероятность появления очередной заявки не зависит от количества предшествующих заявок, имеем дело с потоком без последействия.

*По однородности заявок* выделяют однородные и неоднородные потоки.

*По ограниченности потока заявок* различают замкнутые и разомкнутые системы (система с ограниченной клиентурой называется замкнутой). Так универсальный магазин является разомкнутой системой, тогда как оптовый магазин с постоянными клиентами – замкнутая система.

*По поведению в очереди* системы делятся на системы с отказами (заявка покидает систему, если нет мест в очереди), с ограниченным ожиданием и с ожиданием без ограничения времени.

*По дисциплине выбора на обслуживание.* Здесь можно выделить системы с обслуживанием в порядке поступления, в случайном порядке, в порядке, обратном поступлению (последний пришел – первым обслужен) или с учетом приоритетов.

*По числу каналов обслуживания* системы разделяют на одно – и многоканальные.

*По времени обслуживания* выделяют системы с детерминированным и случайным временем.

*По количеству этапов обслуживания* различают однофазные и многофазные системы.

## 2. Примеры систем и сетей массового обслуживания

В терминах систем массового обслуживания (СМО) описываются многие реальные системы: вычислительные системы, узлы сетей связи, системы посадки самолетов, магазины, производственные участки, любые системы, где возможны очереди и (или) отказы в обслуживании.

В вычислительной системе, как примере реальной системы:

- роль обслуживающего прибора играет ЭВМ;
- роль заявок – решаемые задачи (источником заявок служат терминалы пользователей; моментом выдачи заявки является момент нажатия клавиши для подачи директивы о запуске задачи на решение);
- роль диспетчера исполняет операционная система ЭВМ, она определяет очередность решения задач;
- в роли ячеек буфера выступают ячейки памяти ЭВМ, хранящие сведения о задачах, требующих решения.

В системе разгрузки судна, другой пример реальной системы:

- источниками заявок являются направления, откуда прибывают суда;
- момент выдачи заявки – это момент прибытия судна в зону морского порта для разгрузки/погрузки;
- обслуживающим прибором является причал вместе с персоналом и техническими средствами, организующими разгрузку/погрузку;
- роль буфера играет акватория порта.

Усложнение структур и режимов реальных систем затрудняет применение классических методов теории массового обслуживания ввиду возрастающей размерности решаемых задач, что особенно характерно для систем с сетевой структурой.

Одним из возможных путей преодоления размерности является использование моделей в форме *сетей массового обслуживания* (СeМО).

*Сеть массового обслуживания* представляет собой совокупность конечного числа  $N$  обслуживающих узлов, в которой циркулируют заявки, переходящие в соответствии с маршрутной матрицей из одного узла в другой.

Узел всегда является разомкнутой СМО (причем СМО может быть любого класса). При этом отдельные СМО отображают функционально самостоятельные части реальной системы, связи между СМО, структуру системы, а требования, циркулирующие по СeМО, составляющие материальные потоки (сообщения (пакеты) в коммуникационной сети, задания в мультипроцессорных системах, контейнеры грузопотоков и т.п.).

Для наглядного представления СeМО используется граф, вершины которого (узлы) соответствуют отдельным СМО, а дуги отображают связи между узлами.

Переход заявок между узлами происходит мгновенно в соответствии с переходными вероятностями  $P_{ij}$ ,  $i, j = 1, N$ ,  $p_{ij}$ , вероятность того, что заявка после обслуживания в узле  $i$  перейдет в узел  $j$ .

Естественно, если узлы непосредственно не связаны между собой, то  $p_{ij} = 0$ . Если из  $i$ -го узла переход только в один какой-либо узел  $j$ , то  $p_{ij} = 1$ .

СeМО классифицируют по некоторым признакам.

Сеть называется *линейной*, если интенсивности потоков заявок в узлах связаны между собой линейной зависимостью

$$l_j = a_{ij}l_i,$$

где  $a_{ij}$  – коэффициент пропорциональности, или относительно источника

$$l_j = a_{ij}l_0.$$

Коэффициент  $a_j$  называют *коэффициентом передачи*, он характеризует долю заявок, поступающих в  $j$ -й узел от источника заявок, либо – среднее число прохождений заявкой через данный узел за время нахождения заявки в сети.

Если интенсивности потоков заявок в узлах сети связаны нелинейной зависимостью (например,  $\lambda_j = \sqrt{a_j \lambda_0}$ ), то сеть называется *нелинейной*.

Сеть всегда линейна, если в ней заявки не теряются и не размножаются.

*Разомкнутая сеть* – это такая открытая сеть, в которую заявки поступают из внешней среды и уходят после обслуживания из сети во внешнюю среду. Другими словами, особенностью разомкнутой СeМО (РСeМО) является наличие одного или нескольких независимых внешних источников, которые генерируют заявки, поступающие в сеть, независимо от того, сколько заявок уже находится в сети. В любой момент времени в РСeМО может находиться произвольное число заявок (от 0 до  $\Psi$ ).

В *замкнутой СeМО* (ЗСeМО) циркулирует фиксированное число заявок, а внешний независимый источник отсутствует. Исходя из физических соображений, в ЗСeМО выбирается внешняя дуга, на которой отмечается псевдонулевая точка, относительно которой могут измеряться временные характеристики.

*Комбинированная сеть* – это сеть, в которой постоянно циркулирует определенное число заявок и есть заявки, поступающие от внешних независимых источников.

В однородной сети циркулируют заявки одного класса, и, наоборот, в неоднородной сети могут присутствовать заявки нескольких классов.

Заявки относятся к разным классам, если они различаются хотя бы одним из следующих атрибутов:

- законом распределения длительности обслуживания в узлах;
- приоритетами;
- маршрутами (путями движения заявок в сети).

В *экспоненциальной сети* длительности обслуживания во всех узлах распределены по экспоненциальному закону, и потоки, поступающие в разомкнутую сеть, простейшие (пуассоновские). Во всех остальных случаях сеть является *неэкспоненциальной*.

Если хотя бы в одном узле осуществляется приоритетное обслуживание, то это – приоритетная сеть.

Приоритет – это признак, определяющий очередность обслуживания.

Если обслуживание заявок в узлах осуществляется в порядке поступления, то такая сеть *бесприоритетная*.

Таким образом, *экспоненциальной* будем называть СeМО, отвечающую требованиям:

- входные потоки СeМО пуассоновские;
- во всех N СМО время обслуживания заявок имеет экспоненциальную функцию распределения вероятностей, и заявки обслуживаются в порядке прихода;
- переход заявки с выхода  $i$ -й СМО на вход  $j$ -й является независимым случайным событием, имеющим вероятность  $P_{ijl}$ ,  $j = 1, N$ ;  $P_{i0}$  вероятность ухода заявки из СeМО.

Если заявки приходят в сеть и уходят из нее, то сеть называется *разомкнутой*.

Если заявки не приходят в сеть и из нее не уходят, сеть называется *замкнутой*. Число заявок в замкнутой сети постоянное.

## 2.6. Тема 10: Интегрирование многомерных интегралов по методу Монте-Карло.

Интегрирование многомерных интегралов. Решение примеров вычисления многомерных интегралов по методу Монте-Карло (2 часа).

### 2.6.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:

1. Интегрирование многомерных интегралов

Многомерные интегралы

$$\int_{a_1}^{b_1} \int_{a_2}^{b_2} \dots \int_{a_m}^{b_m} f(x_1, x_2, \dots, x_m) dx_1 dx_2 \dots dx_m$$

вычисляются методом Монте-Карло по алгоритму

$$\frac{(b_1 - a_1)(b_2 - a_2) \dots (b_m - a_m)}{m} \sum_{i=1}^m f(x_1, x_2, \dots, x_m),$$

где  $x_i$  – случайная равномерно распределенная величина;

$f(x_1, x_2, \dots, x_m)$  – подынтегральная функция;

$b_i, a_i$  при  $i = (1, 2, \dots, m)$  – верхний и нижний пределы интегрирования.

Многомерные интегралы вычисляются в Маткаде методом Монте-Карло с помощью встроенной функции  $runif(m, a, b)$ , возвращающей вектор из  $m$  равномерно распределенных случайных чисел в пределах от  $a$  до  $b$ .

## 2 Решение примеров вычисления многомерных интегралов по методу Монте-Карло

Составьте программу и практически решите следующие примеры.

Пример 3. Вычислить методом Монте-Карло приведенный следующий интеграл

$$\int_0^2 \int_0^2 \int_0^2 (x_1 + x_2 + x_3) dx_1 dx_2 dx_3$$

Данный интеграл имеет одинаковые пределы, что облегчает задачу.

Решение

Необходимо выполнить решение численным методом, проанализировать ход решения и сформулировать выводы.

Выберем  $N=10000$ .

```
w := y ← 0
      for i ∈ 1 .. N
        | v ← runif(3,0,2)
        | y ← y + v0 + v1 + v2
        | i
      w ← 2.2 ·  $\frac{2 \cdot y}{N}$ 
      w
```

Ответ:  $w=23,915$

Пример 4. Вычислить методом Монте-Карло интеграл

$$y = \int_1^5 \int_2^8 x_1 x_2 dx_1 dx_2$$

Решение

Выберем  $N=100000$ .

```

w := | y ← 0
      | for i ∈ 1 .. N
      |   | v ← runif(2, 0, 1)
      |   | x1 ← 4v0 + 1
      |   | x2 ← 6·v1 + 2
      |   | y ← y + (x1·x2)
      |   | i
      |   | w ←  $\frac{4 \cdot 6 \cdot y}{N}$ 
      | w
  
```

Ответ:  $w=362,38$

Так как интегралы имеют различные пределы, мы формируем функцией *runif* вектор  $v$  с диапазоном вычислений от нуля до единицы, а затем преобразуем составляющие этого вектора так, чтобы выдерживались заданные пределы.

Для многомерных интегралов большой размерности вычисление методом Монте-Карло происходит значительно быстрее, чем при использовании встроенной функции интегрирования. Так, интеграл

$$y = \int_{1}^{2} \int_{5}^{10} \int_{2}^{8} \int_{3}^{7} \int_{4}^{9} \int_{1}^{8} \int_{0}^{5} \int_{4}^{8} \int_{6}^{9} \int_{5}^{7} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 x_{10} dx_1 dx_2 dx_3 dx_4 dx_5 dx_6 dx_7 dx_8 dx_9 dx_{10}$$

вычисляется на компьютере с тактовой частотой 2 гигагерца встроенной функцией интегрирования более получаса, а методом Монте-Карло при  $N=100000$  менее двух минут.

## 2.7. Тема 11: Моделирование систем массового обслуживания на ЭВМ.

Аналитические методы расчета характеристик пуассоновских СМО.

Моделирование потоков заявок в реальных системах. Моделирование станций обслуживания и очередей (2 часа)

### 2.7.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:

#### 1. Аналитические методы расчета характеристик пуассоновских СМО

Система массового обслуживания одна из основных моделей, используемых инженерами-системотехниками. Как модель, СМО рассматривается в теории массового обслуживания (другое название – теория очередей). Первые работы в этой области были вызваны потребностями практики, в частности широким развитием телефонных сетей. Поэтому в работах по теории СМО широко используется терминология, заимствованная из телефонии: требования, вызовы, заявки, каналы (приборы) обслуживания и т.п.

Теория массового обслуживания связана с разработкой и анализом математических, то есть абстрактных, моделей, которые описывают процесс обслуживания некоторых объектов, поступающих на вход обслуживающего прибора в виде некоторого потока, и образующего в общем случае очередь на входе обслуживающего прибора.

Поскольку рассматриваются абстрактные модели, совершенно не важна природа обслуживаемых объектов и их физические свойства (будь то вызовы, управляющие или информационные кадры в сети связи или посетители магазина, или детали на автоматической линии и т.п.).

Существенным являются моменты появления этих объектов и правила, и законы (математические) их обслуживания, так как от этих моментов и законов зависит адекватное отображение эволюции моделируемого объекта во времени. Поэтому, когда говорят о методах анализа очередей, имеют в виду математические (абстрактные) модели, а из контекста всегда должно быть ясно, для исследования какой реальной системы применяются эти модели.

Целью использования СМО (как модели) является анализ качества функционирования указанных систем-оригиналов.

В свою очередь, СМО используют для определения важнейших системных характеристик информационных систем: производительности; времени доставки пакетов; вероятности потери сообщений и блокировки в узлах; области допустимых значений нагрузки, при которых обеспечивается требуемое качество обслуживания и др.

В теории СМО фундаментальным является понятие *состояния сети*, а важнейшая характеристика сетей МО – *вероятности их состояний*.

Для определения вероятностей состояний СМО исследуют протекающий в сети случайный процесс. В качестве моделей протекающих в СМО процессов наиболее часто используют марковские и полумарковские.

*Марковским процессом* с непрерывным временем описывают функционирование экспоненциальных СМО.

Сеть называется экспоненциальной, если входящие потоки требований в каждую СМО пуассоновские, а времена каждого этапа обслуживания, реализуемого на любой СМО-сети, имеют экспоненциальное распределение. Это позволяет считать, что этапы обслуживания независимы между собой и не зависят ни от параметров входящего потока, ни от состояния сети, ни от маршрутов следования требований.

Теория экспоненциальных СМО наиболее разработана, и ее широко применяют, в том числе, для исследования мультипроцессорных вычислительных систем (ВС).

Разработаны практические формы расчета вероятностно-временных характеристик (ВВХ) таких сетей и систем.

Попытки глубокого анализа немарковских моделей сетевых систем наталкиваются на значительные трудности, которые обусловлены в частности отсутствием независимости длительностей пребывания требований в различных узлах моделей сетевых систем с нестандартными дисциплинами.

Так, например, при достаточно реалистическом предположении о том, что длина требования остается постоянной в процессе его передачи через узлы сети, необходимо прослеживать путь каждого требования, что делает невозможным аналитический расчет характеристики для сети с числом узлов  $M > 2$ .

Анализ работ, посвященных исследованию или расчету немарковских моделей, показывает, что решения, как правило, получены алгоритмически путем сложных численных расчетов с использованием преобразований Лапласа-Стильеса, реализуются программно, отличаются большой трудоемкостью, либо значительными погрешностями в оценке показателей производительности информационных систем (ИС) в области средней и большой нагрузки. Поэтому для моделирования СМО, выходящих из класса мультиплекативных, используют приближенные методы.

Сравнительный анализ приближенных методов моделирования СМО и примеры показывают, что пользоваться приближенными методами расчета СМО необходимо с большой осторожностью, что при расчете конкретных СМО в процессе решения различных прикладных задач представляется необходимым проведение исследований в целях оценки точности и чувствительности применяемого метода, а также проведение эксперимента по имитационному моделированию исходной СМО для достаточно большого множества значений варьируемых параметров.

Таким образом, аналитические методы расчета характеристик ИС базируются, как правило, на анализе экспоненциальных СМО. При использовании этого

математического аппарата удается получить аналитические модели для решения широкого круга задач исследования систем.

Семо – это, прежде всего, совокупность взаимосвязанных систем массового обслуживания. Поэтому необходимо вспомнить основные особенности этих систем.

## 2. Моделирование потоков заявок в реальных системах. Моделирование станций обслуживания и очередей

Большой класс систем, которые сложно изучить аналитическими способами, но которые хорошо изучаются методами статистического моделирования, сводится к *системам массового обслуживания* (СМО).

В СМО подразумевается, что есть типовые пути (каналы обслуживания), через которые в процессе обработки проходят заявки.

Принято говорить, что заявки обслуживаются каналами.

Каналы могут быть разными по назначению, характеристикам, они могут сочетаться в разных комбинациях.

Заявки могут находиться в очередях и ожидать обслуживания.

Часть заявок может быть обслужена каналами, а части могут отказать в этом.

Важно, что заявки, с точки зрения системы, абстрактны: это то, что желает обслужиться, то есть пройти определенный путь в системе. Каналы являются также абстракцией: это то, что обслуживает заявки.

Заявки могут приходить неравномерно, каналы могут обслуживать разные заявки за разное время и так далее, количество заявок всегда весьма велико. Все это делает такие системы сложными для изучения и управления, и проследить все причинно-следственные связи в них не представляется возможным. Поэтому принято представление о том, что обслуживание в сложных системах носит случайный характер.

Примерами СМО могут служить: автобусный маршрут и перевозка пассажиров; производственный конвейер по обработке деталей; влетающая на чужую территорию эскадрилья самолетов, которая «обслуживается» зенитками ПВО; ствол и рожок автомата, которые «обслуживают» патроны; электрические заряды, перемещающиеся в некотором устройстве и т.д.

Но все эти системы объединены в один класс СМО, поскольку подход к их изучению един. Он состоит в том, что, во-первых, с помощью генератора случайных чисел разыгрываются случайные числа, которые имитируют *случайные* моменты появления заявок и время их обслуживания в каналах. Но в совокупности эти случайные числа, конечно, подчинены статистическим закономерностям.

К примеру, пусть сказано: «заявки в среднем приходят в количестве 5 штук в час». Это означает, что времена между приходом двух соседних заявок случайны, например: 0.1; 0.3; 0.1; 0.4; 0.2, как это показано на рисунке 1, но в сумме они дают в среднем 1 ( обратите внимание, что в примере это не точно 1, а 1.1 – но зато в другой час эта сумма, например, может быть равной 0.9); и только за достаточно большое время среднее этих чисел станет близким к одному часу.

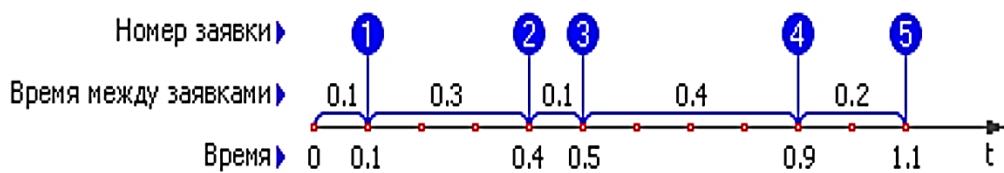


Рисунок 1 – Случайный процесс прихода заявок в СМО

Результат (например, пропускная способность системы), конечно, тоже будет случайной величиной на отдельных промежутках времени. Но измеренная на большом

промежутке времени, эта величина будет уже, в среднем, соответствовать точному решению. То есть для характеристики СМО интересуются ответами в статистическом смысле.

Итак, систему испытывают случайными входными сигналами, подчиненными заданному статистическому закону, а в качестве результата принимают статистические показатели, усредненные по времени рассмотрения или по количеству опытов.

Во-вторых, все модели СМО собираются типовым образом из небольшого набора элементов (канал, источник заявок, очередь, заявка, дисциплина обслуживания, стек, кольцо и так далее), что позволяет имитировать эти задачи типовым образом.

Для этого модель системы собирают из конструктора таких элементов. Неважно, какая конкретно система изучается, важно, что схема системы собирается из одних и тех же элементов. Разумеется, структура схемы будет всегда различной.

Перечислим некоторые основные понятия СМО.

**Каналы** – то, что обслуживает; бывают горячие (начинают обслуживать заявку в момент ее поступления в канал) и холодные (каналу для начала обслуживания требуется время на подготовку).

**Источники заявок** – порождают заявки в случайные моменты времени, согласно заданному пользователем статистическому закону. Заявки, они же клиенты, входят в систему (порождаются источниками заявок), проходят через ее элементы (обслуживаются), покидают ее обслуженными или неудовлетворенными. Бывают нетерпеливые заявки – такие, которым надоело ожидать или находиться в системе и которые покидают по собственной воле СМО.

Заявки образуют *потоки* – поток заявок на входе системы, поток обслуженных заявок, поток отклоненных заявок. Поток характеризуется количеством заявок определенного сорта, наблюдаемым в некотором месте СМО за единицу времени (час, сутки, месяц), то есть поток есть величина статистическая.

**Очереди** характеризуются правилами стояния в очереди (дисциплиной обслуживания), количеством мест в очереди (сколько клиентов максимум может находиться в очереди), структурой очереди (связь между местами в очереди). Бывают ограниченные и неограниченные очереди.

Перечислим важнейшие дисциплины обслуживания.

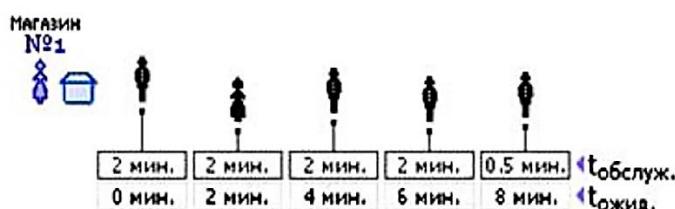
**FIFO** (FirstIn, FirstOut – первым пришел, первым ушел): если заявка первой пришла в очередь, то она первой уйдет на обслуживание.

**LIFO** (LastIn, FirstOut – последним пришел, первым ушел): если заявка последней пришла в очередь, то она первой уйдет на обслуживание (пример – патроны в рожке автомата).

**SF** (ShortForward – короткие вперед): в первую очередь обслуживаются те заявки из очереди, которые имеют меньшее время обслуживания.

Пример, показывающий, как правильный выбор той или иной дисциплины обслуживания позволяет получить ощутимую экономию по времени.

Пусть имеется два магазина. В магазине № 1 обслуживание осуществляется в порядке очереди, то есть здесь реализована дисциплина обслуживания FIFO (рисунок 2).



Среднее время ожидания:  $(0 + 2 + 4 + 6 + 8) / 5 = 4 \text{ мин.}$

Рисунок 2 – Организация очереди по дисциплине FIFO

Время обслуживания  $t_{обслуж}$  на рисунке 2 показывает, сколько времени продавец затратит на обслуживание одного покупателя.

Понятно, что при покупке штучного товара продавец затратит меньше времени на обслуживание, чем при покупке, к примеру, сыпучих продуктов, требующих дополнительных манипуляций (набрать, взвесить, высчитать цену и т.п.). Время ожидания  $t_{ожид}$  показывает, через какое время очередной покупатель будет обслужен продавцом.

В магазине № 2 реализована дисциплина SF (рисунок 3), означающая, что штучный товар можно купить вне очереди, так как время обслуживания  $t_{обслуж}$  такой покупки невелико.

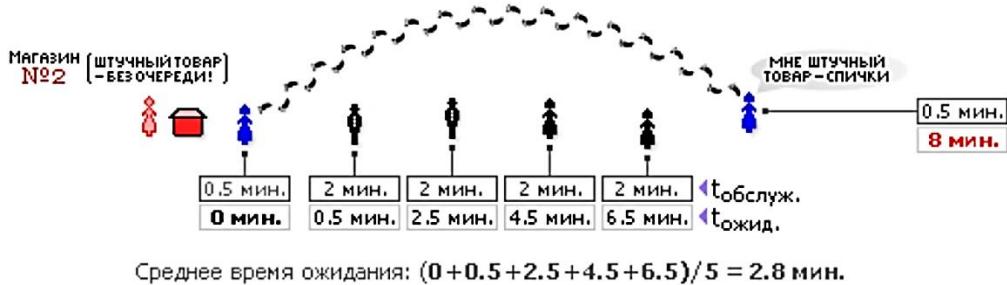


Рисунок 3 – Организация очереди по дисциплине SF

Как видно из обоих рисунков, последний (пятый) покупатель собирается приобрести штучный товар, поэтому время его обслуживания невелико – 0,5 минут. Если этот покупатель придет в магазин № 1, он будет вынужден выстоять в очереди целых 8 минут, в то время как в магазине № 2 его обслужат сразу же, вне очереди.

Таким образом, среднее время обслуживания каждого из покупателей в магазине с дисциплиной обслуживания FIFO составит 4 минуты, а в магазине с дисциплиной обслуживания KB – лишь 2,8 минуты. А общественная польза, экономия времени составит:

$$(1 - 2.8/4) \times 100\% = 30 \text{ процентов!}$$

В результате 30% сэкономленного для общества времени – и это лишь за счет правильного выбора дисциплины обслуживания.

Специалист по системам должен хорошо понимать ресурсы производительности и эффективности проектируемых им систем, скрытые в оптимизации параметров, структур и дисциплинах обслуживания. Моделирование помогает выявить эти скрытые резервы.

При анализе результатов моделирования важно также указать интересы и степень их выполнения. Различают интересы клиента и интересы владельца системы. Заметим, что эти интересы совпадают не всегда.

Судить о результатах работы СМО можно по следующим *показателям*:

- вероятность обслуживания клиента системой;
- пропускная способность системы;
- вероятность отказа клиенту в обслуживании;
- вероятность занятости каждого из канала и всех вместе;
- среднее время занятости каждого канала;
- вероятность занятости всех каналов;
- среднее количество занятых каналов;
- вероятность простоя каждого канала;
- вероятность простоя всей системы;
- среднее количество заявок, стоящих в очереди;
- среднее время ожидания заявки в очереди;
- среднее время обслуживания заявки;
- среднее время нахождения заявки в системе.

Судить о качестве полученной системы нужно по совокупности значений показателей.

При анализе результатов моделирования (показателей) важно также обращать внимание на интересы клиента и интересы владельца системы, то есть минимизировать или максимизировать надо тот или иной показатель, а также на степень их выполнения.

Чаще всего интересы клиента и владельца между собой не совпадают или совпадают не всегда. Показатели обозначим  $H = \{h_1, h_2, \dots\}$ .

*Параметрами СМО* могут быть:

- интенсивность потока заявок;
- интенсивность потока обслуживания;
- среднее время, в течение которого заявка готова ожидать обслуживания в очереди;
- количество каналов обслуживания;
- дисциплина обслуживания и так далее.

Параметры влияют на показатели системы. Параметры обозначим как  $R = \{r_1, r_2, \dots\}$ .

**2.8. Тема 12:**Поиск глобального экстремума функции в заданной области методом Монте-Карло. Решение примеров поиска глобального экстремума функции в заданной области методом Монте-Карло (2 часа).

### **2.8.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:**

1. Поиск глобального экстремума функции в заданной области методом Монте-Карло

Нелинейные функции в большинстве случаев имеют не один, а несколько экстремумов. Самый большой максимум или минимум называется *глобальным экстремумом*, остальные – *локальными*.

При решении задачи, как правило, необходимо определение глобального экстремума. Ниже дается решение такой задачи в Маткаде для заранее заданной области. Вне ее глобальный экстремум может быть другим.

2. Решение примеров поиска глобального экстремума функции в заданной области методом Монте-Карло

Составьте программу и практически решите следующий пример.

Пусть задана многоэкстремальная функция

$$y = xe^{-2x}\sin(15x).$$

Рассмотрим ее графики при различных пределах изменения аргумента  $x$ :

На рисунке 1 видно, что для области изменения аргумента  $-2 \leq x \leq 4$  глобальный экстремум находится в районе  $x = -2$  и равен примерно 75.

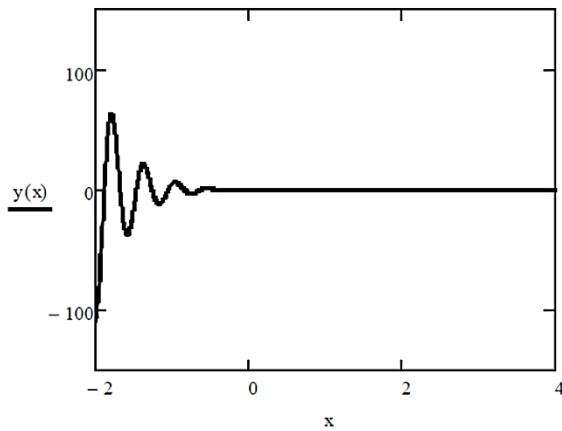


Рисунок 1 – График заданной функции

Из рисунка 2 следует, что для другой области изменения аргумента глобальный экстремум находится в районе  $x = 0,5$ .

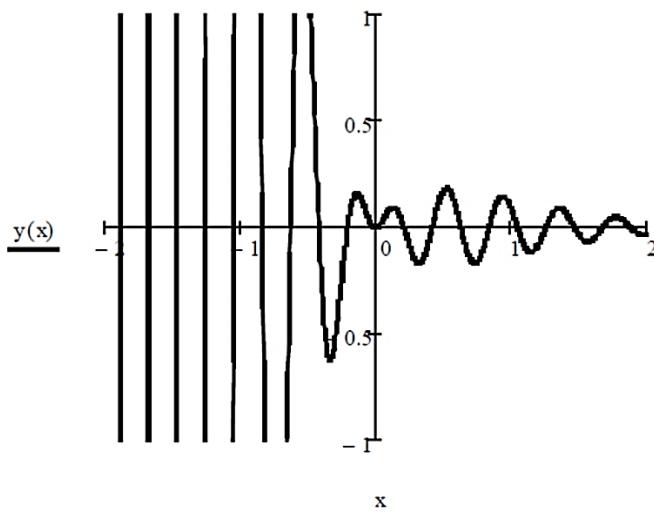


Рисунок 2 – График функции в новом диапазоне  $x$

Найдем глобальный минимум этой функции в пределах изменения аргумента  $0 < x < 3$ , используя метод Монте-Карло. Сформируем два вектора  $X$  и  $Y$ , присвоив их нулевым элементам значение нуль.

Зададимся количеством случайных чисел  $N$ , которые мы будем использовать для вычисления минимума. Чем больше это количество, тем точнее будет результат:

$$X := 0, \quad Y := 0, \quad N := 10000.$$

С помощью функции  $rnd(x)$  создадим вектор случайных значений элементов  $x_i$ . Функция  $rnd(x)$  генерирует равномерно распределенные случайные числа в интервале  $0 - x$ . На графике видно, что нам достаточно интервал  $0 - 3$ .

$$i := 1 \dots N, \quad X_i := rnd(3).$$

Теперь в векторе  $X$  помещено 10000 случайных чисел. Вычислим значения функции от них и поместим их в вектор  $Y$ :  $Y_i := y(X_i)$ .

Величину максимального элемента этого вектора найдем, используя функцию  $\max$ :  $Y_0 := \max(Y), \quad Y_0 := 0,184$ .

Мы вычислили (приближенно) максимальное значение заданной функции. Теперь необходимо определить значение аргумента, соответствующее минимальному значению функции.

Для этого составим небольшую программку и вычислим по ней ответ:

$X_0 := \text{for } i \in 1..N$

$$\begin{cases} X_0 \leftarrow X_i \text{ if } Y_0 = Y_i & X_0 = 0.5 \\ X_0 \end{cases}$$

## 2.9. Тема 13: Моделирование СМО в пространстве состояний (2 часа).

### 2.9.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:

Рассмотрим следующую систему:

1) Требования поступают в случайные моменты времени, при этом промежуток времени  $Q$  между любыми двумя последовательными требованиями имеет экспоненциальный закон с параметром  $\mu$ , т.е. функция распределения:

$$F_q(\tau) = 1 - e^{-\mu\tau}, \quad \tau \geq 0. \quad (1)$$

2) Система обслуживания состоит из  $s$  одинаковых, пронумерованных приборов.

3) Время  $t_{\text{обсл}}$  – случайная величина с равномерным законом распределения на отрезке  $[a, b]$ .

4) Система без ожидания, то есть требование, заставшее все приборы занятыми, покидает систему.

5) Дисциплина обслуживания такова: если в момент поступления  $k$ -го требования первый прибор свободен, то он приступает к обслуживанию требования; если этот прибор занят, а второй свободен, то требование обслуживается вторым прибором, и т.д.

Требуется оценить математические ожидания числа требований, обслуженных системой за время  $T$  и получивших отказ.

За начальный момент расчета выберем момент поступления первого требования  $T_1 = 0$ . Введем следующие обозначения:  $T_k$  – момент поступления  $k$ -го требования;  $t_i$  – момент окончания обслуживания требования  $i$ -м прибором,  $i = 1, 2, 3, \dots, s$ .

Предположим, что в момент  $T_1$  все приборы свободны.

Первое требование поступает на прибор 1. Время обслуживания этим прибором имеет равномерное распределение на отрезке  $[a, b]$ . Поэтому конкретное значение  $t_{\text{обсл}}$  этого времени находим по формуле:

$$t_{\text{обсл}} = a + r(b - a),$$

где  $r$  – значение случайной величины  $R$ , равномерно распределенной на отрезке  $[0, 1]$ .

Прибор 1 будет занят в течение времени  $t_{\text{обсл}}$ . Поэтому момент времени  $t_1$  окончания обслуживания требования прибором 1 следует считать равным:

$$t_1 = T_1 + t_{\text{обсл}}.$$

Затем следует добавить единицу в счетчик обслуженных требований и перейти к рассмотрению следующего требования.

Предположим, что  $k$  требований уже рассмотрено. Определим момент  $T_{k+1}$  поступления  $(k + 1)$ -го требования. Для этого найдем значение  $t$  промежутка времени между последовательными требованиями. Так как этот промежуток имеет показательный закон, то

$$t = -\frac{1}{\mu} \ln r, \quad (2)$$

где  $r$  – очередное значение случайной величины.

Тогда момент поступления  $(k + 1)$ -го требования:

$$T_{k+1} = T_k + t.$$

Свободен ли в этот момент первый прибор?

Для ответа на этот вопрос необходимо проверить условие  $t_1 \leq T_k + 1$ .

Если это условие выполнено, то к моменту  $T_k + 1$  первый прибор освободился и может обслуживать требование. В этом случае  $t_1$  заменяем на  $(T_k + 1 + t_{\text{обсл}})$ , добавляем

единицу в счетчик обслуженных требований и переходим к следующему требованию. Если  $t_1 > T_k + 1$ , то первый прибор в момент  $T_k + 1$  занят. В этом случае проверяем, свободен ли второй прибор. Если условие  $t_2 \leq T_k + 1$  выполнено, заменяем  $t_2$  на  $(T_k + 1 + t_{\text{обсл}})$ , добавляем единицу в счетчик обслуженных требований и переходим к следующему требованию. Если  $t_2 > T_k + 1$ , то проверяем условие  $t_3 \leq T_k + 1$  и т.д. Если при всех  $i$  от 1 до  $s$  имеет  $t_i > T_k + 1$ , то в момент  $T_k + 1$  все приборы заняты. В этом случае прибавляем единицу в счетчик отказов и переходим к рассмотрению следующего требования. Каждый раз, вычислив  $T_k + 1$ , надо проверить еще условие окончания реализации

$$T_k + 1 \leq T.$$

Если это условие выполнено, то одна реализация процесса функционирования системы воспроизведена и испытание заканчивается. В счетчике обслуженных требований и в счетчике отказов находятся числа  $n_{\text{обсл}}$  и  $n_{\text{отк}}$ .

Повторив такое испытание  $n$  раз (с использованием различных  $r$ ) и усреднив результаты опытов, определим оценки математических ожиданий числа обслуженных требований и числа требований, получивших отказ:

$$M_{n_{\text{обсл}}} \approx \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (n_{\text{обсл}})_j, \quad (3)$$

$$M_{n_{\text{отк}}} \approx \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (n_{\text{отк}})_j. \quad (4)$$

где  $(n_{\text{обсл}})_j$  и  $(n_{\text{отк}})_j$  – значения величин  $n_{\text{обсл}}$  и  $n_{\text{отк}}$  в  $j$ -ом опыте.

### Раздел 3. Агентные технологии имитационного моделирования

**3.1. Тема 14:** Общая концепция интеллектуального агента имитационного моделирования. Принципы построения имитационных моделей активных систем. Понятие интеллектуального агента. Мультиагентная имитация (2 часа)

#### 3.1.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:

1. Принципы построения имитационных моделей активных систем

Процесс функционирования сложной системы можно рассматривать как смену ее состояний, описываемых ее фазовыми переменными  $Z_{1(t)}, Z_{2(t)}, \dots, Z_{n(t)}$  в  $n$ -мерном пространстве.

Задачей имитационного моделирования является получение траектории движения рассматриваемой системы в  $n$ -мерном пространстве ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ ), а также вычисление некоторых показателей, зависящих от выходных сигналов системы и характеризующих ее свойства.

В данном случае «движение» системы понимается в общем смысле – как любое изменение, происходящее в ней.

Известны два принципа построения модели процесса функционирования систем.

##### Принцип $\Delta t$

Рассмотрим этот принцип сначала для детерминированных систем. Предположим, что начальное состояние системы соответствует значениям  $Z_1(t_0), Z_2(t_0), \dots, Z_n(t_0)$ .

Принцип  $\Delta t$  предполагает преобразование модели системы к такому виду, чтобы значения  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  в момент времени  $t_1 = t_0 + \Delta t$  можно было вычислить через начальные значения, а в момент  $t_2 = t_1 + \Delta t$  – через значения на предшествующем шаге и так для каждого  $i$ -го шага ( $\Delta t = \text{const}, i = 1 + M$ ).

Для систем, где случайность является определяющим фактором, принцип  $\Delta t$  заключается в следующем:

1) Определяется условное распределение вероятности на первом шаге ( $t_1 = t_0 + \Delta t$ ) для случайного вектора, обозначим его  $(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ . Условие состоит в том, что начальное состояние системы соответствует точке траектории  $(Z_{01}, Z_{02}, \dots, Z_{0n})$ .

2) Вычисляются значения координат точки траектории движения системы ( $t_1 = t_0 + \Delta t$ ), как значения координат случайного вектора, заданного распределением, найденным на предыдущем шаге.

3) Отыскиваются условное распределение вектора ( $Z_{21}, Z_{22}, \dots, Z_{2n}$ ) на втором шаге ( $t_2 = t_1 + \Delta t$ ), при условии получения соответствующих значений  $Z_{1i}$  ( $i = 1 \dots n$ ) на первом шаге и т.д., пока  $t_i = t_0 + i\Delta t$  не примет значения ( $t_M = t_0 + M\Delta t$ ).

Принцип  $\Delta t$  является универсальным, применим для широкого класса систем. Его недостатком является неэкономичность с точки зрения затрат машинного времени.

#### *Принцип особых состояний (принцип $\delta z$ )*

При рассмотрении некоторых видов систем можно выделить два вида состояний:

– обычное, в котором система находится большую часть времени, при этом  $Z_i(t)$ , ( $i = 1 \dots n$ ) изменяются плавно;

– особое, характерное для системы в некоторые моменты времени, причем состояние системы изменяется в эти моменты скачком.

Принцип особых состояний отличается от принципа  $\Delta t$  тем, что шаг по времени в этом случае не постоянен, является величиной случайной и вычисляется в соответствии с информацией о предыдущем особом состоянии.

Примерами систем, имеющих особые состояния, являются системы массового обслуживания. Особые состояния появляются в моменты поступления заявок, в моменты освобождения каналов и т.д.

Для таких систем применение принципа  $\Delta t$  является нерациональным, так как при этом возможны пропуски особых состояний и необходимы методы их обнаружения.

В практике использования имитационного моделирования описанные выше принципы при необходимости комбинируют.

## 2. Понятие интеллектуального агента

В компьютерной науке, *интеллектуальный агент* – это программа, самостоятельно выполняющая задание, указанное пользователем компьютера, в течение длительных промежутков времени.

Интеллектуальные агенты используются для содействия оператору или сбора информации. Одним из примеров заданий, выполняемых агентами, может служить задача постоянного поиска и сбора необходимой информации в Интернете.

Компьютерные вирусы, боты, поисковые роботы – все это также можно отнести к интеллектуальным агентам. Хотя такие агенты имеют строгий алгоритм, «интеллектуальность» в этом контексте понимается как способность приспосабливаться и обучаться.

В искусственном интеллекте, под термином интеллектуальный агент понимаются разумные сущности, наблюдающие за окружающей средой и действующие в ней, при этом их поведение рационально в том смысле, что они способны к пониманию и их действия всегда направлены на достижение какой-либо цели.

Такой агент может быть как роботом, так и встроенной программной системой. Об интеллектуальности агента можно говорить, если он взаимодействует с окружающей средой примерно так же, как действовал бы человек.

Эти два значения понятия «интеллектуальный агент» достаточно различны, и между ними почти нет связи.

Интеллектуальный агент в первом смысле может быть разработан, используя традиционные методы разработки, в нем немногим больше интеллекта, чем в почтовом клиенте или утилите для форматирования жесткого диска.

Однако интеллектуальный агент во втором смысле может быть полностью независимым, выполняя свои задачи.

Динамика поведения большой активной системы в условиях неопределенности и конфликта в большинстве случаев непредсказуема и конечное ее состояние не может быть прогнозируемо из начального аналитически или путем логического анализа, так как оно является результатом многошагового взаимодействия активных элементов системы.

### 3. Мультиагентная имитация

Любая программа нужна для того, чтобы решать определенную задачу:

- управление атомными реакторами и электрическими зубными щетками;
- стимуляция работы сердца и системы электронного шпионажа;
- денежные переводы и спекуляции на финансовых рынках;
- трехмерное моделирование будущих реальных товаров и порождения большой фантазии дизайнеров компьютерных игр и др.

Представьте себе, что вам нужно решить глобальную задачу. В одиночку сделать этого вы ее не можете, т.к. ваши ресурсы одного человека весьма ограничены.

В технических системах все обстоит точно так же. Сложные задачи не могут быть решены средней рукой компьютером. Это всегда будет так, не зависимо от роста общего технологического уровня человечества.

Если задачу может решить один среднестатистический человек или компьютер, то ее уже нельзя считать сложной. Так возникает *мультиагентная система* или *многоагентная система* (MAC, англ. Multi-agentsystem) — это система, образованная некоторыми взаимодействующими интеллектуальными агентами.

Многоагентные системы могут быть использованы для решения таких проблем, которые сложно или невозможно решить с помощью одного агента или монолитной системы.

Примерами таких задач являются онлайн-торговля, ликвидация чрезвычайных ситуаций, и моделирование социальных структур.

Многие MAC имеют компьютерные реализации, основанные на пошаговом имитационном моделировании.

Компоненты MAC обычно взаимодействуют через матрицу ответов.

Модель «Запрос — Ответ — Соглашение» — обычное явление для MAC — схема реализуется за несколько шагов.

Для последнего шага обычно требуется еще несколько (более мелких) актов обмена информацией. При этом принимаются во внимание другие компоненты, в том числе уже достигнутые «соглашения» и ограничения среды.

MAC также относятся к самоорганизующимся системам, так как в них ищется оптимальное решение задачи без внешнего вмешательства.

Под оптимальным решением понимается решение, на которое потрачено наименьшее количество энергии в условиях ограниченных ресурсов.

Главное достоинство MAC — это гибкость. Многоагентная система может быть дополнена и модифицирована без переписывания значительной части программы.

Также эти системы обладают способностью к самовосстановлению и обладают устойчивостью к сбоям, благодаря достаточному запасу компонентов и самоорганизации.

Многоагентные системы применяются в нашей жизни в графических приложениях, например, в компьютерных играх. Агентные системы также были использованы в фильмах.

Теория MAC используется в составных системах обороны. Также MAC применяются в транспорте, логистике, графике, геоинформационных системах и многих других.

Многоагентные системы хорошо зарекомендовали себя в сфере сетевых и мобильных технологий, для обеспечения автоматического и динамического баланса нагруженности, расширяемости и способности к самовосстановлению.

### **3.2. Тема 15: Инструментальные средства и системы имитационного моделирования в объектно-ориентированных языках программирования (2 часа).**

#### **3.2.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:**

Использование современных ЭВМ и вычислительных комплексов и сетей является мощным средством реализации имитационных моделей и исследования с их помощью характеристик процесса функционирования систем S.

В ряде случаев в зависимости от сложности объекта моделирования, т. е. системы S, рационально использование персональных ЭВМ (ПЭВМ) или локальных вычислительных сетей (ЛВС). В любом случае эффективность исследования системы S на программно-реализуемой модели прежде всего зависит от правильности схемы моделирующего алгоритма, совершенства программы и только косвенным образом зависит от технических характеристик ЭВМ, применяемой для моделирования.

Большое значение при реализации модели на ЭВМ имеет вопрос правильного выбора языка моделирования.

##### *Моделирование систем и языки программирования*

Алгоритмические языки при моделировании систем служат вспомогательным аппаратом разработки, машинной реализации и анализа характеристик моделей. Каждый язык моделирования должен отражать определенную структуру понятий для описания широкого класса явлений.

Выбрав для решения задачи моделирования процесса функционирования системы конкретный язык, исследователь получает в распоряжение тщательно разработанную систему абстракций, предоставляющих ему основу для формализации процесса функционирования исследуемой системы S.

Высокий уровень проблемной ориентации языка моделирования значительно упрощает программирование моделей, а специально предусмотренные в нем возможности сбора, обработки и вывода результатов моделирования позволяют быстро и подробно анализировать возможные исходы имитационного эксперимента с моделью M. Основными моментами, характеризующими качество языков моделирования, являются:

- удобство описания процесса функционирования системы S;
- удобство ввода исходных данных моделирования и варьирования структуры, алгоритмов и параметров модели;
- реализуемость статистического моделирования, эффективность анализа и вывода результатов моделирования;
- простота отладки и контроля работы моделирующей программы;
- доступность восприятия и использования языка.

Будущее языков моделирования определяется прогрессом в области создания мультимедийных систем машинной имитации, а также проблемно-ориентированных на цели моделирования информационно-вычислительных систем.

Основные понятия, связанные с алгоритмическими языками и их реализацией на ЭВМ вообще и языками моделирования в частности.

*Язык программирования* представляет собой набор символов, распознаваемых ЭВМ и обозначающих операции, которые можно реализовать на ЭВМ. На низшем уровне находится основной язык машины, программа на котором пишется в кодах, непосредственно соответствующих элементарным машинным действиям (сложение, запоминание, пересылка по заданному адресу и т. д.).

Следующий уровень занимает автокод (язык АССЕМБЛЕРА) вычислительной машины. Программа на автокоде составляется из мнемонических символов, преобразуемых в машинные коды специальной программой – ассемблером.

*Компилятором* называется программа, принимающая инструкции, написанные на алгоритмическом языке высокого уровня, и преобразующая их в программы на основном языке машины или на автокоде, которые в последнем случае транслируются еще раз с помощью ассемблера.

*Интерпретатором* называется программа, которая, принимая инструкции входного языка, сразу выполняет соответствующие операции в отличие от компилятора, преобразующего эти инструкции в запоминающиеся цепочки команд. Трансляция происходит в течение всего времени работы программы, написанной на языке интерпретатора.

В отличие от этого компиляция и ассемблирование представляют собой однократные акты перевода текста с входного языка на объектный язык машины, после чего полученные программы выполняются без повторных обращений к транслятору.

Программа, составленная в машинных кодах или на языке АССЕМБЛЕРА, всегда отражает специфику конкретной ЭВМ. Инструкции такой программы соответствуют определенным машинным операциям и, следовательно, имеют смысл только в той ЭВМ, для которой они предназначены, поэтому такие языки называются машинно-ориентированными языками.

Большинство языков интерпретаторов и компиляторов можно классифицировать как *процедурно-ориентированные языки*. Эти языки качественно отличаются от машинно-ориентированных языков, описывающих элементарные действия ЭВМ и не обладающих проблемной ориентацией. Все процедурно-ориентированные языки предназначены для определенного класса задач, включают в себя инструкции, удобные для формулировки способов решения типичных задач этого класса. Соответствующие алгоритмы программируются в обозначениях, не связанных ни с какой ЭВМ.

*Язык моделирования* представляет собой процедурно-ориентированный язык, обладающий специфическими чертами.

Основные языки моделирования разрабатывались в качестве программного обеспечения имитационного подхода к изучению процесса функционирования определенного класса систем.

#### *Особенности использования алгоритмических языков*

Рассмотрим преимущества и недостатки использования для моделирования процесса функционирования систем языков имитационного моделирования (ЯИМ) и языков общего назначения (ЯОН), то есть универсальных и процедурно-ориентированных алгоритмических языков. Целесообразность использования ЯИМ вытекает из двух основных причин:

1) удобство программирования модели системы, играющее существенную роль при машинной реализации моделирующих алгоритмов;

2) концептуальная направленность языка на класс систем, необходимая на этапе построения модели системы и выборе общего направления исследований в планируемом машинном эксперименте.

Практика моделирования систем показывает, что именно использование ЯИМ во многом определило успех имитации как метода экспериментального исследования сложных реальных объектов.

Языки моделирования позволяют описывать моделируемые системы в терминах, разработанных на базе основных понятий имитации. До того как эти понятия были четко определены и формализованы в ЯИМ, не существовало единых способов описания имитационных задач, а без них не было связи между различными разработками в области постановки имитационных экспериментов.

Высокоуровневые языки моделирования являются удобным средством общения заказчика и разработчика машинной модели Мм. Несмотря на перечисленные преимущества ЯИМ, в настоящее время выдвигаются основательные аргументы как

технического, так и эксплуатационного характера против полного отказа при моделировании от универсальных и процедурно-ориентированных языков.

Технические возражения против использования ЯИМ: вопросы эффективности рабочих программ, возможности их отладки и т.п.

В качестве эксплуатационных недостатков упоминается нехватка документации по существующим ЯИМ, сугубо индивидуальный характер соответствующих трансляторов, усложняющий их реализацию на различных ЭВМ, и трудности исправления ошибок.

Снижение эффективности ЯИМ проявляется при моделировании задач более разнообразных, чем те, на которые рассчитан конкретный язык моделирования. Но здесь следует отметить, что в настоящее время не существует и ЯОН, который был бы эффективен при решении задач любого класса.

Серьезные недостатки ЯИМ проявляются в том, что в отличие от широко применяемых ЯОН, трансляторы с которых включены в поставляемое изготовителем математическое обеспечение всех современных ЭВМ, языки моделирования, за небольшим исключением, разрабатывались отдельными организациями для своих достаточно узко специализированных потребностей.

Соответствующие трансляторы плохо описаны и приспособлены для эксплуатации при решении задач моделирования систем, и поэтому, несмотря на достоинства ЯИМ, приходится отказываться от их практического применения в ряде конкретных случаев.

При создании системы моделирования на базе любого языка необходимо решить вопрос о синхронизации процессов в модели, так как в каждый момент времени, протекающего в системе (системного времени), может потребоваться обработка нескольких событий, то есть требуется псевдопараллельная организация имитируемых процессов в машинной модели Мм.

Это является основной задачей монитора моделирования, который выполняет следующие функции: управление процессами (согласование системного и машинного времени) и управление ресурсами (выбор и распределение в модели ограниченных средств моделирующей системы).

### **3.3. Тема 16: Агентно-ориентированные технологии ситуационного моделирования больших систем. Моделирование событий. Базисные, мобильные и структурные компоненты имитационных моделей (2 часа)**

#### **3.3.1. Перечень и краткое содержание рассматриваемых вопросов:**

1. Агентно-ориентированные технологии ситуационного моделирования больших систем

Агентно-ориентированные имитационные модели можно реализовать в различных системах и программных продуктах.

Рассмотрим пример реализации агентных моделей в универсальной имитационной системе Simplex3, предоставляющей среду экспериментирования с обработкой результатов имитации и компонентно-ориентированный язык описания моделей ModelDescriptionLanguage (Simplex-MDL).

Модель системы составляется из базисных MDL-компонентов, описывающих состояние и динамику поведения элементов системы, организационных компонентов, задающих структуру взаимосвязей между базисными компонентами, и мобильных компонентов – для описания сообщений, размещаемых в накопительных массивах и образующих очереди на обслуживание.

Описания базисных компонентов включает разделы переменных состояния и динамики поведения агентов в виде алгебраических и дифференциальных уравнений, временных и условных событий, описывающих суть конфликта.

Рассмотрим агентные технологии моделирования на примере процедуры торга (переговорного процесса, где в качестве агентов выступают агенты-продавцы и агенты-покупатели). Продавцы и покупатели представлены в виде массивов базисных компонентов, соответственно, классов Seller и Buyer. Диалог между компонентами осуществляется через мобильный компонент Dialog, содержащий сообщения переговорного процесса, и базисный компонент Connect, направляющий сообщения Dialog конкретному получателю (продавцу или покупателю).

Поведение агента описывается как некоторая итерационная процедура переработки данных о состоянии агентов и мотиваций его действия. Каждой операции присущ свой алгоритмический и программный модуль:

- 1) Восприятие информации и накопление знаний в среде взаимодействия.
- 2) Связь с механизмом взаимодействия и обработки данных от противников-агентов.
- 3) Анализ собственного состояния и состояния противника агента с выбором или корректировкой мотиваций в виде целевых функций.
- 4) Принятие локальных решений и выбор стратегий.

Состояние агента можно описать с интеллектуальных, эмоциональных, психофизиологических и функциональных позиций.

Формализация эмоционального состояния интеллектуального агента в многомерном эмоциональном пространстве и использование его в принятии решения.

Базисные компоненты объединяются в мультиагентную модель компонентом верхнего уровня Market в MDL-описании.

События маркетингового периода составляют фазу транзакции с выбором покупателями продавца и совершением покупки и фазу ценообразования с подведением итогов предыдущего периода и определением цены на следующий период.

Мультиагентная модель конфликтной ситуации представляет воспроизведение переходного процесса движения к согласию и разрешению конфликта путем имитации тактического взаимодействия его участников в заданной среде.

Алгоритм переговорного процесса (процедуры торга) в транзактивной фазе включает цикл перебора конфликтующих элементов  $j = 1, m$  с выбором переговорного партнера по критерию выбора или предпочтения и разыгрыванием согласия или отказа  $j$ -го агента с одной стороны от предложений  $i$ -го агента  $i = 1, n$  с другой конфликтующей стороны. При взаимных уступках в переговорном процессе стороны все более склоняются к согласию так, что на каждом следующем шаге переговоров вероятность согласия увеличивается на определенную величину. При достижении согласия на том или ином этапе следует разрешение конфликта.

Моделирование поведения продавцов-конкурентов в фазе ценообразования связано со стратегиями эластичного ценообразования и в простейшем случае по завершению транзактивной фазы сводится к определению агентом-продавцом новой цены по формуле, в которой фигурируют текущая цена  $k$ -го периода имитации, и цены за  $k-1$ -го и  $k-2$ -го периода соответственно  $i$ -го продавца; спрос покупателей за  $k-1$ -го и  $k-2$ -го периода соответственно у  $i$ -го продавца; предложение  $i$ -го продавца за предыдущий период.

Другой моделью эластичного ценообразования является стратегия симплексного планирования эксперимента с поиском дрейфующего экстремума функции прибыли в условиях неопределенной конфликтной ситуации. Сравнивая значения функции отклика в различных точках факторного пространства, например, цена и предложение, агент оценивает предпочтительное направление желательного смещения рабочей точки к оптимуму.

В общем случае многомерное факторное пространство наряду с ценой и объемом предложений может включать все множество характеристик конкурентов и среды как, например, текущая доля рынка, объем продаж, доставка, реклама, качество и т.д.

Стратегия каждого продавца сводится к решению на очередном шаге задачи оптимизации с выбором вектора изменения состояния в направлении экстремума целевой функции прибыли или доли рынка. При этом успех одного продавца – олигополиста и улучшение его целевой функции ведет к неудаче конкурента и его соответствующей реакции на следующем шаге.

Таким образом, стратегии конкурирующих агентов строятся с учетом состояния друг друга и в результате многошаговой имитации их поведения приводят к воспроизведению некоторого стабилизированного состоянию рынка.

Результаты моделирования, основанные на стратегии симплексного ценообразования для двух продавцов однородного продукта в среде Simplex3, позволяют представить в графической форме.

## 2. Моделирование событий

Любая работа (можно предположить) в системе совершается путем выполнения активностей. То есть активность является наименьшей единицей работы и ее рассматривают как единый дискретный шаг. Следовательно, активность является, единым динамическим объектом, указывающим на совершение единицы работ.

Процесс – это логически связанный набор активностей.

Пример: активность установки головки жесткого диска, активность передачи информации с жесткого диска.

Активности проявляются в результате свершения событий.

События – это мгновенное изменение состояния некоторого объекта системы.

Рассмотренные объекты (активности, процессы, события) являются *конструктивными элементами* для динамического описания поведения системы. На их основе строятся языки моделирования системы. В то время, когда динамическое поведение системы формируется в результате выполнения большого числа взаимодействующих процессов, сами эти процессы образуют относительно небольшое число классов. Чтобы описать поведение системы, достаточно описать поведение каждого класса процессов и задать значение атрибутов для конкретных процессов.

*Задачи построения модели*

Построение модели состоит из решения двух основных задач:

1) Первая задача сводится к тому, чтобы описать правила, описывающие виды процессов, происходящих в системе.

2) Вторая задача заключается в том, чтобы описать правила задания атрибутов или задать правила генерации этих значений. При этом система определяется на конкретном уровне детализации в терминах множества описаний процессов, каждый из которых в свою очередь включает множество правил и условий возбуждений активности. Такое описание системы может быть детализировано на более подробном или более иерархическом уровне представления с помощью декомпозиции процессов (в идеальном случае в активности). Это обеспечивает многоуровневое исследование системы.

Так как система в общем случае служит для описания временного поведения, то язык моделирования дискретных систем должен обладать средствами, отображающими время.

В реальной системе совместно выполняются несколько активностей, принадлежащим как связанным, так и не связанным процессам. Имитация их действий должна быть строго последовательной.

Таким образом, модель системы можно рассматривать как модель описаний, активностей, событий или процессов. Отсюда и деление языков моделирования.

### 3. Базисные, мобильные и структурные компоненты имитационных моделей

Базисные, мобильные и структурные компоненты описываются на примере построения и реализации объектно-ориентированной мультиагентной модели логистической системы на примере мясоперерабатывающего предприятия АПК в универсальной имитационной системе Simplex3, и представляющей собой:

- банк моделей пользователя;
- среду экспериментирования с обработкой результатов имитации;
- компонентно-ориентированный язык описания моделей Simplex-MDL (ModelDescriptionLanguage) и язык описания эксперимента Simplex-EDL (ExperimentDescriptionLanguage).

Каждый агент описывается базисным MDL-компонентом с именем-идентификатором, декларированием переменных состояния и связей с другими компонентами и описанием динамики временного поведения агента с помощью алгебраических и дифференциальных уравнений или последовательности событий.

Базисные компоненты объединяются в общую мультиагентную модель системы с помощью структурных компонентов, задающих структуру взаимосвязей между базисными компонентами, и мобильных компонентов – для описания сообщений или потоков между агентами.

Мультиагентная имитационная модель логистической системы мясоперерабатывающего предприятия АПК, включает базисные компоненты интеллектуальных агентов (ИА), описывающих:

- потоки поступления различных видов с/х животных от различных поставщиков (компонент SkotoBazi\_High) и блочного мясного сырья (компонент Block);
- разветвляющиеся материальные потоки цеха убоя и первичной переработки с/х животных UboiRazd с двумя стратегиями: по заданным планам выпуска первичной продукции и по результатам структурной оптимизации материальных потоков по минимальному отклонению от заданной структуры ассортимента (процедура SferaRazb);
- процесс загрузки/выгрузки продукции в соответствующие камеры производственного холодильника (компонент KamHladZum, объединяющий базисные подкомпоненты, имитирующие работу камер охлаждения HladKam, замораживания ZumKam основной продукции (мяса) и замораживания сопутствующей продукции ZumKamSub);
- работу цехов переработки сырья с сетевой структурой материальных потоков (компонент Pererab) с двумя моделями поведения: выпуск готовой продукции по заданному плану и результатам структурного перераспределения материальных потоков с минимизацией отклонения от заданной структуры ассортимента (процедура SferaSbora);
- загрузку/выгрузку продукции в соответствующие камеры хранения и очереди WaitM на обслуживание автомобилей с заказами торгующих организаций (компонент KamHranSbit, имитирующий семь различных вариантов обслуживания заказов в зависимости от их количества, объемов и состава);
- поступление и обслуживание транспортных средств в очереди WaitM перед погрузочными рампами (базисный компонент Expidiciya).

Перемещающиеся и размещаемые в накопительных массивах (Location) в очередях на обслуживание материальные потоки описываются в мобильных компонентах в виде описания передвижных объектов.