

СОДЕРЖАНИЕ

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	2
ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ОБОБЩЁННЫХ СМО	2
МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	6
ЭТАПЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	9
<i>Концептуальное моделирование</i>	9
<i>Реализация модели средствами моделирования</i>	9
<i>Калибровка и идентификация модели</i>	10
<i>Компьютерный эксперимент</i>	10
НАПРАВЛЕНИЯ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	10
ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ANYLOGIC	11
ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	12

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ограниченность математического моделирования СМО

Любая информационно-вычислительная система (ИВС) по своему предназначению является системой обслуживания заявок, поступающих от пользователей и ожидающих результата их обработки. Поэтому при разработке ИВС возможность оценки её характеристик как системы массового обслуживания имеет важное значение.

Использование для оценки характеристик СМО математических моделей основано на допущении, что функционирование СМО во времени представляется непрерывной марковской цепью, в которой все события переходов между состояниями являются простейшими потоками событий. В результате вероятности состояний марковской цепи выражаются в аналитической форме, а именно - в виде системы дифференциальных уравнений Колмогорова над вероятностями состояний СМО. Нахождение таких вероятностей, как решение системы уравнений Колмогорова, в итоге позволяет выразить в аналитической форме фундаментальные характеристики СМО: абсолютную и относительную пропускную способность, вероятности отказов в обслуживании заявок, среднее время обслуживания заявок и т.п.

Однако на практике для получения не только качественных, но и практически значимых результатов анализа, необходимо учитывать целый ряд специфических особенностей функционирования ИВС, которые относят ИВС к категории так называемых обобщённых СМО (Рисунок 1).

Принципиальной особенностью рассмотрения ИВС в виде обобщённой СМО является то, что поступающие на вход ИВС потоки заявок в общем случае являются не однородными и не простейшими. При этом заявки разного типа (например, с разным приоритетом) имеют различные условия обслуживания. Иными словами, вероятности состояний системы в общем случае зависят от параметров заявки. Например, причиной отказа заявке в постановке в очередь на обслуживание может служить отсутствие места в очереди для заявки именно данного типа. При этом при поступлении высокоприоритетной заявки менее приоритетная заявка получает

отказ в обслуживании и выталкивается из СМО. В результате этого образуются потоки *выталкивающих отказов* с интенсивностями λ_i^m, λ_j^m .

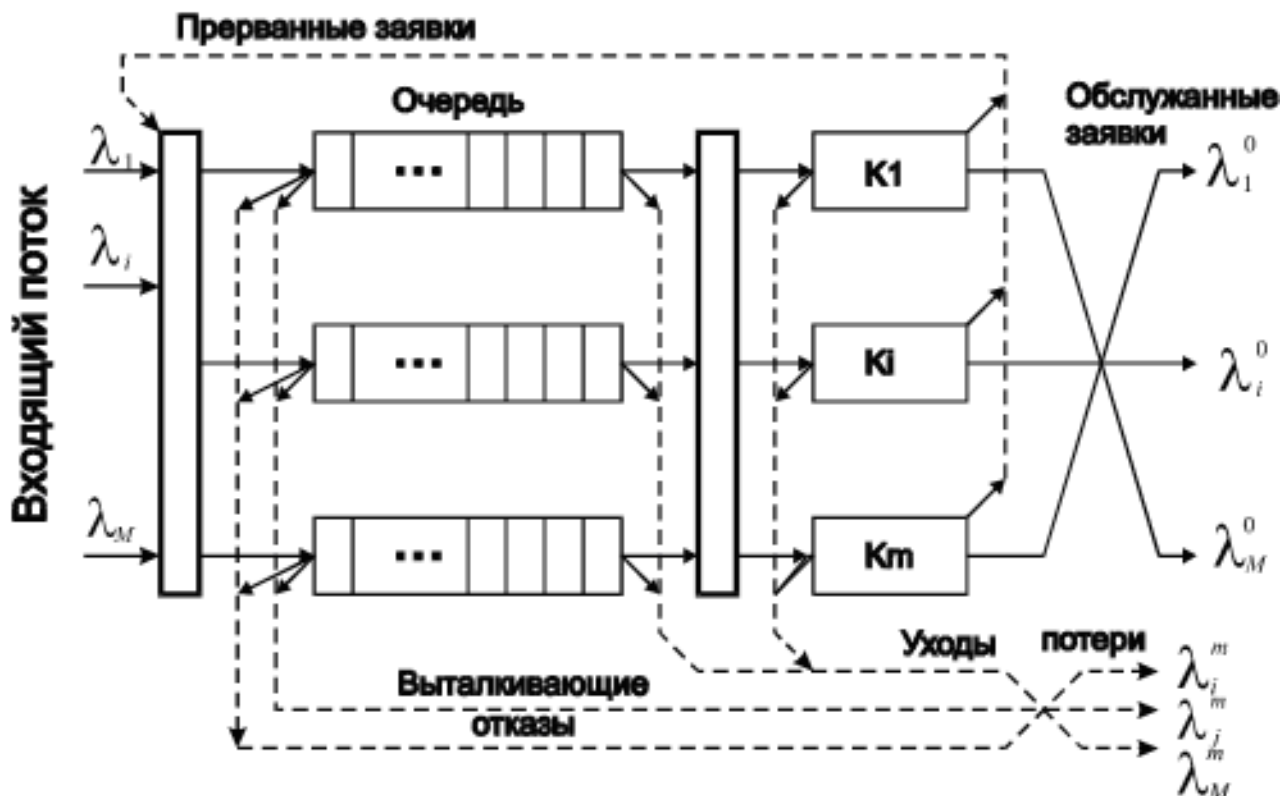


Рисунок 1 Обобщённая схема СМО

Другой важной характеристикой заявки может быть ограниченное время ожидания начала обработки. По истечении этого времени заявка вынужденно покидает систему, образуя *потоки уходов* с интенсивностями λ_M^m . Потоки выталкивающих отказов вместе с потоками уходов образуют обобщённый поток *потерь* системы. Заявки, поступившие на обслуживание в канал и полностью обработанные покидают СМО, образуя на выходе поток обслуженных заявок с интенсивностями $\lambda_1^0, \dots, \lambda_i^0, \dots, \lambda_M^0$.

Различают разомкнутые и замкнутые СМО. В замкнутых СМО в зависимости от дисциплины обслуживания, реализуемой СМО, обработка заявки, поступившей в канал K_i на обработку, может быть прервано из-за исчерпания временно выделенного вычислительного ресурса. Такой режим обработки заявок каналом называется квантованием времени обработки. Если выделенный заявке каналом квант времени оказывается достаточным, то заявка полностью обрабатывается и покидает систему как обслуженная заявка. В противном случае

недообработанная заявка вновь отправляется в очередь для продолжения обслуживания.

В разомкнутой СМО заявки, принятые на обслуживание, и формирующие выходные потоки отказов, уходов и потерь, не могут поступить в какой-либо элемент СМО, т.к. обратная связь в системе отсутствует.

Как правило, модели СМО, адекватно отражающие особенности реальных систем, являются композицией нескольких элементарных приборов обслуживания P_i . Если каналы K_i различных приборов обслуживания соединены параллельно, то имеет место многоканальное обслуживание (*многоканальная СМО*), а если приборы P_i и их параллельные композиции соединены последовательно, то имеет место многофазное обслуживание (*многофазная СМО*). При этом нужно заметить, что выходной поток (поток обслуженных заявок), покидающий элементарный прибор обслуживания, обычно становится потоком с последствием, даже если в входном потоке это свойство отсутствовало. Чтобы убедиться в этом, представим одноканальную СМО, для которой минимальное время обслуживания одной заявки заранее определено и равно $\tau_{об}^{min}$. Тогда в потоке обслуженных заявок минимальный интервал времени между заявками, покидающими систему, будет заранее предопределён и равен $\tau_{об}^{min}$. Нетрудно убедиться, что наличие такого минимального интервала неизбежно приводит к последствию. Действительно, пусть стало известно, что в какой-то момент t_1 систему покинула обслуженная заявка. Тогда можно с достоверностью утверждать, что на любом участке времени τ , лежащем в пределах $(t_1, t_1 + \tau_{об}^{min})$, не появится обслуженной заявки, а значит, будет иметь место зависимость между количествами событий на не перекрывающихся временных участках. Последствие, присущее выходному потоку, необходимо учитывать, если этот поток является входным для какой-либо другого прибора обслуживания (например, при многофазном обслуживании).

Отметим, также, что самый простой на первый взгляд *регулярный поток*, в котором события отделены друг от друга равными интервалами, отнюдь не является "простым", так как в нем имеется ярко выраженное последствие: моменты появления следующих друг за другом событий связаны жёсткой,

функциональной зависимостью. Именно из-за наличия последствия анализ процессов, протекающих в системе массового обслуживания при регулярном потоке заявок, гораздо сложнее, чем при простейшем.

Подводя итог анализу особенностей обобщённых СМО приходится сделать вывод, что практическое применение аналитических моделей СМО возможно лишь для упрощённого качественного анализа характеристик ИВС, представляя их в виде СМО с классической структурой и "удобными" потоками входных и обработанных заявок. Следовательно, для практически значимой оценки характеристик ИВС в форме обобщённых СМО использование математических моделей крайне ограничено.

Моделирование СМО как реагирующей системы

Альтернативой аналитическому моделированию может быть моделирование функционирования обобщённой СМО в виде диаграммы реагирующей системы, с последующей программной реализацией на компьютере, и использование статистических методов анализа характеристик. Графо-аналитический язык диаграмм реагирующих систем позволяет учесть и реализовать в модели обобщённой СМО все существенные особенности функционирования ИВС. Для анализа характеристик СМО проводятся эксперименты с программной реализацией её диаграммы реагирующей системы, в результате которых статистически оцениваются не только вероятности нахождения диаграммы в том или ином состоянии, но различные другие производные характеристики СМО.

Наличие в языке диаграмм реагирующих систем сложных состояний (гиперсостояний) позволяет отразить в диаграмме естественную структуру ИВС в виде иерархически связанных подсистем, что упрощает её моделирование на различных уровнях иерархии.

Теоретически любая ИВС при моделировании может быть представлена как СМО в виде реагирующей системы иерархической структуры. Однако количество состояний и переходов диаграммы реагирующей системы с увеличением сложности СМО растёт в "геометрической прогрессии". Это является основной

причиной, ограничивающей возможность практического использования языка диаграмм реагирующих систем для моделирования сложных ИВС.

Метод имитационного моделирования

Классические методы математического моделирования, а также моделирование СМО в виде реагирующих систем имеют известные границы применения. Они ориентированы на высокий и средний уровень абстракции (минимум деталей, стратегический уровень). Чем ниже уровень абстракции (много деталей, операционный уровень), чем сложнее цели и задачи исследования объектов, процессов, явлений и систем, тем сложнее построить для них адекватную формальную математическую модель и уж тем более получить её характеристики, используя классические аналитические или даже численные методы анализа.

Использование для моделирования СМО диаграмм реагирующих систем сталкивается с нарастающей сложностью их построения. Поэтому на практике получил развитие и активно используется *метод имитационного моделирования*, который позволяет преодолеть проблему как математического моделирования, так и представления обобщённой СМО в виде сложной диаграммы реагирующей системы.

Метод имитационного моделирования основан на *объектной имитации* структуры и реальной работы СМО, создавая так называемые имитационные модели. При этом создание в имитационной модели объектов одновременно допускает использование для их формализации различных других методов, например, математического или статистического моделирования, гармонично сочетая их. В отличие от применения для моделирования ИВС диаграмм реагирующих систем, сложность имитационных моделей не формируется количеством состояний и переходов, а по сути отражает реальную структурную и/или функциональную спецификацию исследуемой ИВС, что позволяет строить имитационные модели ИВС как СМО любой сложности. Поэтому метод имитационного моделирования, основанный на построении *виртуального* (информационного) аналога предмета моделирования, имитирующее структуру и поведение ИВС *во времени*, с совершенствованием компьютеров стали активно

развиваться и использоваться на практике. Иерархическая структура имитационной модели позволяет предельно естественным образом отразить множество связанных и взаимодействующих между собой элементов структуры различных уровней иерархии моделируемой ИВС. Глубина иерархической декомпозиции предмета моделирования определяется в итоге возможностью формально выразить функционирование во времени каждого элемента иерархической структуры, используя любые аналитические, численные методы или диаграммы реагирующих систем для выражения отношений между параметрами объектов имитационной модели. Исследование характеристик построенной и программно реализованной имитационной модели предмета моделирования выражается в её «прогоне» на компьютере в модельном времени, накоплении и анализе полученных результатов.

Таким образом:

– *Имитационным моделированием* называют компьютерное моделирование, основанное на объектной имитации структуры и поведения структурных элементов предмета моделирования во времени, а результат моделирования называют *имитационной моделью*.

– В отличие от классических методов моделирования имитационное моделирование базируется на принципах объектно-ориентированного моделирования и программирования. Имитационная модель выражается в виде компьютерной программы, интерфейс взаимодействия с которой, моделирует взаимодействие исследователя с виртуальным аналогом предмета моделирования.

– Имитационная модель способна одновременно отражать в себе как многоуровневую структуру, так и любой сложности поведение предмета моделирования во времени. При этом теоретически отсутствуют ограничения, препятствующие повышению степени соответствия виртуального аналога предмету моделирования. По мере необходимости имитационная модель может развиваться и совершенствоваться.

– Исследование имитационных моделей осуществляется в форме экспериментирования с виртуальным аналогом предмета моделирования на

компьютере. Компьютерный эксперимент с моделью выражается в её прогоне в модельном времени. В процессе экспериментов анализируются изменения параметров имитационной модели во времени, накапливается необходимый статистический материал для анализа результатов экспериментов.

ОРГАНИЗАЦИЯ И СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Этапы имитационного моделирования

Построение имитационной модели предполагает выполнение следующих этапов.

Концептуальное моделирование

На этом этапе происходит *структуризация* модели, т.е. выделение уровней иерархии, отдельных подсистем, определение элементарных компонентов модели и их связей на каждом уровне иерархии. Зачастую структура имитационной модели на некотором уровне абстракции отражает структуру предмета моделирования, а связи между компонентами модели являются отражением реальных связей. На этапе концептуального моделирования:

- происходит формулировка цели моделирования,
- структурный анализ предмета моделирования и протекающих в нём процессов.

От цели моделирования зависит, какие процессы в предмете моделирования будут выделены и отражены в имитационной модели, а от каких процессов необходимо абстрагироваться, какие характеристики выделенных процессов следует учитывать, а какие – нет, какие соотношения между переменными и параметрами модели должны быть отражены в модели.

Реализация модели средствами моделирования

Элементы системы, их связи, параметры и переменные, а также их соотношения и законы их изменения во времени должны быть выражены средствами выбранной среды имитационного моделирования, т.е. в этой среде должны быть определены параметры и переменные модели, построены процедуры вычисления зависимых переменных и характеристик модели во времени. Крайне желательно использовать средства визуализации динамических процессов, протекающих в модели.

Калибровка и идентификация модели

На этом этапе осуществляется сбор данных и проведение измерений тех характеристик реальной системы, которые должны быть введены в модель в виде значений параметров и распределений случайных величин.

Далее, необходимо выполнить *проверку правильности* или адекватности модели (*валидация*), которая состоит в том, что выходные характеристики модели проверяются на специально подобранных тестовых режимах, в которых реальное поведение системы и её характеристики априори известны или очевидны.

Компьютерный эксперимент

Последним этапом работы с моделью является *компьютерный эксперимент*. В простейшем случае компьютерный эксперимент – это выполнение модели при различных её параметрах (факторах) и регистрация характеристик поведения. Более сложные эксперименты предполагают анализ чувствительности модели, оценку результатов различных вариантов управляющих воздействий, а также нахождение оптимальных значений параметров и условий рационального функционирования модели.

Направления и инструментальные средства имитационного моделирования

В имитационном моделировании выделяют четыре основных направления:

1. Моделирование *динамических систем*.
2. *Дискретно-событийное* моделирование.
3. *Системная динамика*.
4. *Агентное* моделирование.

В каждом из этих направлений развиваются свои инструментальные средства, упрощающие разработку моделей и их анализ. Существует множество языков и средств имитационного моделирования, которые в первую очередь различаются удобством использования в конкретных предметных областях и направлениях моделирования, поскольку их основное назначение - сокращение сроков построения или модификации имитационных моделей.

Моделирование *динамических систем* направлено на исследование сложных

объектов, описываемых системами алгебраических и дифференциальных уравнений. Моделирование здесь заключается в использовании численных методов решения систем уравнений, представленных блок-схемами, составленными из решающих блоков: интеграторов, усилителей и сумматоров,. Такой подход эффективно реализован, например, в инструментальной среде *Simulink* [].

Дискретно-событийное моделирование, при котором потоки пассивных заявок обрабатываются активными приборами, реализовано в среде моделирования *GPSS* [].

Для моделирования *системной динамики* используются среды моделирования, в которых функционирование моделируемой системы описывается потоковыми диаграммами [].

Многоагентные (или просто агентные) модели используются для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами, а наоборот, глобальные правила и законы функционирования системы в целом являются результатом индивидуальной активности её децентрализованных объектов (агентов). Цель агентных моделей – получить представление об общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении её отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе. Концепция агентного моделирования реализована, например, в системе *AnyLogic* [].

Программная система имитационного моделирования AnyLogic

Программная система *AnyLogic* – профессиональный инструмент, интегрирующий различные направления имитационного моделирования []. Базовой концепцией *AnyLogic* является представление модели как набора параллельно и асинхронно функционирующих во времени и взаимодействующих друг с другом активных программных объектов. Активные объекты могут динамически порождаться и уничтожаться, отражая особенности функционирования моделируемой системы.

Графическая среда моделирования AnyLogic поддерживает проектирование, разработку, документирование модели, выполнение компьютерных экспериментов с моделью, включая различные виды анализа – от анализа чувствительности до оптимизации параметров модели относительно некоторого критерия.

AnyLogic не ограничивает пользователя одной-единственной парадигмой моделирования, что характерно фактически для других инструментов моделирования, существующих сегодня на рынке. Разработчик может гибко использовать различные уровни абстрагирования, различные стили и концепции, строить модели в рамках той или иной парадигмы и смешивать их в рамках создания одной и той же модели, использовать ранее разработанные модули, собранные в библиотеки, дополнять и строить свои собственные библиотеки модулей.

Богатые возможности анимации и визуализации представления результатов в процессе работы модели способствуют пониманию сути процессов, происходящих в моделируемой системе, упрощают отладку модели.

Преимущества и недостатки имитационного моделирования

На ранних этапах своего развития метод имитационного моделирования наиболее ярко проявил себя при исследовании систем массового обслуживания. Практически нет ограничений по сложности СМО, которые не позволили бы построить соответствующую имитационную модель СМО и исследовать её. Примерами таких систем могут служить: телефонные станции, справочные бюро, фондовые биржи, системы передачи и распределения информации и т.д. В настоящее время имитационное моделирование широко применяется для исследования моделей различных сложных систем. Этому способствуют преимущества, присущие этому методу, а именно:

1. Разработка и экспериментирование с имитационными моделями, как правило, менее затратное, чем проведение натуральных экспериментов с реальными системами. Тем более что иногда эксперименты на реальных системах в принципе невозможны.

2. Имитационное моделирование, позволяя уйти от натуральных экспериментов с реальными системами к «натурным» экспериментам с виртуальными аналогами, является прямой альтернативой сугубо математическому моделированию, если на практике построение таких моделей или их анализ вызывает значительные или непреодолимые трудности.

3. При наличии эффективных средств построения виртуальных моделей появляется принципиальная возможность разрабатывать несколько альтернативных вариантов моделей системы и затем сравнивать их между собой на соответствие исходным характеристикам предмета моделирования.

4. Экспериментирование с имитационной моделью во времени позволяет ускорить реализацию длительного интервала функционирования системы в реальном времени в «сжатые сроки» в модельном времени, или наоборот, «замедлить» быстро протекающие процессы, чтобы изучить более подробно их работу на «развёрнутом» интервале времени.

5. При моделировании стохастических систем можно в короткие сроки осуществлять многочисленные прогоны имитационной модели для накопления статистики и получения адекватных оценок вероятностных характеристик системы.

Несмотря на перечисленные возможности и достоинства необходимо отметить и следующие ограничения имитационного моделирования:

1. В зависимости от сложности моделируемой системы построение её имитационной модели может оказаться весьма дорогостоящим и занять немало времени. При этом, несмотря на то, что на разработку модели может уйти много времени и труда, в общем случае нельзя точно доказать, что работа модели полностью соответствует работе реальной системы.

2. Имитационное моделирование требует проведения многочисленных вычислительных экспериментов на компьютерах с ограниченной разрядной сеткой ячеек памяти. Поэтому возможно, что модель явно стабильной системы может при неблагоприятном сочетании результатов вычислений или генерируемых событий

повести себя не предсказуемо. Поэтому доказательство адекватности имитационной модели является не простым делом.

3. Для "прогона" сложных моделей требуется довольно значительное компьютерное время.

4. Имитационные модели не поддаются формальному анализу, как математические модели, и поэтому не позволяют делать теоретические обобщения.

Учитывая отмеченные недостатки, можно сделать вывод, что эффективность разработки и использования на практике имитационных моделей существенно зависит от наличия и мощности средств имитационного моделирования, обеспечивающих приемлемые временные и стоимостные затраты.