

Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Поволжский государственный университет телекоммуникаций и
информатики»

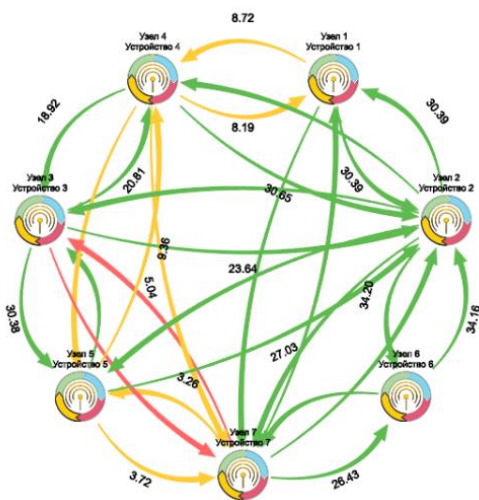
Кафедра сетей и систем связи

Е.В. Глушак

Методы моделирования и оптимизации

Учебное пособие по дисциплине
«Методы моделирования и оптимизации»
по направлению подготовки

11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы
СВЯЗИ»



Самара
2021

УДК 004.724.4
ББК 3288
Г555

Рекомендовано к изданию методическим советом ПГУТИ
протокол №XX от XX.04.2021г.

Рецензент:

Декан факультета телекоммуникаций и радиотехники ФГБОУ ВО
ПГУТИ, к.т.н., доцент Киреева Н.В.

Глушак Е.В.

Г555 Методы моделирования и оптимизации: учебное пособие по дисциплине «Методы моделирования и оптимизации» [Текст] / Е.В. Глушак – Самара: ПГУТИ, 2021. – 73 с.

В учебном пособии собран основной материал по методам моделирования и разработке имитационных моделей сетей связи, в котором рассматриваются целый ряд технологий построения сетей связи в программах для моделирования, приводятся основные понятия и определения теории моделирования. Содержание курса обеспечивает слушателей необходимым объемом знаний для освоения основ построения и анализа современных сетей связи.

Учебное пособие предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также полезно для студентов, обучающихся по следующим направлениям: 09.04.02 «Информационные системы и технологии», 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» и др.

© ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики», 2021

© Глушак, Е.В. 2021

Содержание

Введение.....	4
Раздел 1 Введение в дисциплину методы моделирования и оптимизации.....	5
Раздел 2 Математические схемы моделирования систем.....	15
Раздел 3 Имитационное моделирование систем.....	33
Раздел 4 Моделирование случайных воздействий.....	43
Раздел 5 Моделирование систем с использованием типовых математических схем и автоматизированных программ	45
Задание для практических занятий №1	67
Задание для практических занятий №2.....	70
Литература.....	71
Глоссарий.....	72

Введение

Ни один проект крупной сети со сложной топологией в настоящее время не обходится без исчерпывающего моделирования будущей сети. Программы, выполняющие эту задачу, достаточно сложны и дороги. Целью моделирования является определение оптимальной топологии, адекватный выбор сетевого оборудования, определение рабочих характеристик сети и возможных этапов будущего развития. Ведь сеть, слишком точно оптимизированная для решений задач текущего момента, может потребовать серьезных переделок в будущем. Моделирование используется для исследования характеристик новых модификаций протоколов, методы работы с очередями, для оптимизации параметров качества обслуживания.

Учебное пособие состоит из 5 разделов, предусмотренных рабочей программой ПГУТИ. В разделе 1 рассматривается введение в дисциплину, методы моделирования и оптимизации. Раздел 2 посвящен математическим схемам моделирования систем. В 3-м разделе обсуждается имитационное моделирование систем. Раздел 4 предлагает обзор моделирования случайных воздействий. В разделе 5 рассматривается моделирование систем с использованием типовых математических схем и автоматизированных программ.

В списке источников даны ссылки на нормативные документы, статьи и монографии, использованные при написании учебного пособия.

1 Введение в дисциплину методы моделирования и оптимизации

1.1 Понятие моделирования, модели и системы

Моделирование - это замещение одного объекта (оригинала) другим (моделью) и фиксация или изучение свойств оригинала путем исследования свойств модели. Объект (система) определяется совокупностью параметров и характеристик. Множество параметров системы отражает ее внутреннее содержание - структуру и принципы функционирования. Характеристики системы - это ее внешние свойства, которые важны при взаимодействии с другими системами. Характеристики системы находятся в функциональной зависимости от ее параметров [1].

Теория моделирования представляет собой взаимосвязанную совокупность положений, определений, методов и средств создания и изучения моделей. Эти положения, определения, методы и средства, как и сами модели, являются предметом теории моделирования.

Основная задача теории моделирования заключается в том, чтобы вооружить исследователей технологией создания таких моделей, которые достаточно точно и полно фиксируют интересующие свойства оригиналов, проще или быстрее поддаются исследованию и допускают перенесение его результатов на оригиналы.

Трудно переоценить роль моделирования в научных изысканиях, инженерном творчестве и, вообще, в жизни человека. Разработка и познание любой системы сводится по существу, к созданию ее модели. Особую ценность имеют конструктивные модели, то есть такие, которые допускают не фиксацию свойств, но и исследование зависимостей характеристик от параметров системы. Такие модели позволяют оптимизировать функционирование систем.

При изложении теоретических знаний по данной дисциплине предлагаются наиболее известные в литературе методы и средства моделирования. Выбор методов осуществлялся также с точки зрения возможности их применения для исследования вычислительных систем (ВС). В качестве примеров при изложении материала также, как правило, выступают ВС различного назначения и их компоненты.

Модель объекта - это физическая или абстрактная система, адекватно представляющая объект исследования [1]. В теории моделирования используются преимущественно абстрактные модели - описания объекта исследования на некотором языке. Абстрактность модели проявляется в том, что компонентами модели являются не физические элементы, а понятия, в качестве которых наиболее широко

используются математические. Абстрактная модель, представленная на языке математических отношений, называется математической моделью. Математическая модель имеет форму функциональной зависимости $Y=F(X)$, где Y и X - соответственно характеристики и параметры моделируемой системы, а F - функция, воспроизводимая моделью. Построение модели сводится к выявлению функции F и представлению ее в форме, пригодной для вычисления значений $Y = F(X)$. Модель позволяет оценивать характеристики Y для заданных параметров X и выбирать значения параметров, обеспечивающие требуемые характеристики, с использованием процедур оптимизации.

Состав характеристик Y определяется в зависимости от исследуемых свойств системы - производительности, надежности, стоимости и других свойств и должен гарантировать полноту отображения этих свойств. Состав параметров X должен охватывать все существенные аспекты организации системы, изучение влияния которых на качество функционирования составляет цель исследования, производимого с помощью модели.

Область определения модели характеризует диапазон исследуемых вариантов организации системы. Чем шире состав характеристик и параметров, а также область определения модели, тем универсальнее модель в отношении задач, которые можно решать с ее использованием.

Допустимые погрешности оценки характеристик и точность задания параметров определяют требования к точности модели. Так, если изменения характеристик в пределах 10% несущественны для выбора того или иного варианта системы, то точность определения характеристик должна составлять $\pm 5\%$. В большинстве случаев параметры, и в первую очередь параметры рабочей нагрузки, могут быть заданы лишь приближенно, с относительной погрешностью 10-25%. В таких случаях нет смысла предъявлять высокие требования к точности воспроизведения моделью характеристик системы и погрешности их оценки на уровне 5-15% вполне приемлемы.

Модель, удовлетворяющая вышеперечисленным требованиям по составу характеристик и параметров и точности воспроизведения характеристик по всей области определения, называется адекватной системе. Существенное влияние на адекватность оказывает область определения модели. Практически любая модель обеспечивает высокую точность воспроизведения характеристик в пределах малой окрестности точки $X = \{x_1, \dots, x_n\}$. Чем шире область определения модели, тем меньше шансов, что некоторая модель окажется адекватной системе.

Другое свойство модели - сложность. Сложность модели принято характеризовать двумя показателями: размерностью и сложностью вычислений, связанных с определением характеристик. Размерность модели - число величин, представляющих в модели параметры и характеристики. Сложность вычислений, выполняемых при расчете характеристик $Y = F(X)$, оценивается числом операций, приходящихся на одну реализацию оператора F . Обычно сложность вычислений связывается с затратами ресурсов ЭВМ и характеризуется числом процессорных операций и емкостью памяти для хранения информации, относящейся к модели. Сложность вычислений - монотонно возрастающая функция размерности модели. Поэтому более сложной модели присущи одновременно большая размерность и сложность вычислений [1].

Сложность модели определяется также сложностью моделируемой системы и назначением модели (состав характеристик и параметров, воспроизводимых моделью), размером области определения и точностью модели. Чем сложнее система, то есть чем больше число входящих в нее элементов и процессов, из которых складывается функционирование системы, тем сложнее модель. Увеличение числа воспроизводимых характеристик и параметров, области определения и точности оценки характеристик приводят к увеличению сложности модели.

1.2 Краткий обзор методов моделирования

Модели объектов делятся на два больших класса: материальные (физические) и абстрактные (математические). Среди физических моделей наибольшее распространение получили аналоговые модели. С развитием математики широкое применение получили математические модели. По существу вся математика создана для составления и исследования моделей объектов или процессов.

Создание математической модели преследует две основные цели [1]:

- дать формализованное описание структуры и процесса функционирования системы для однозначности их понимания;
- попытаться представить процесс функционирования в виде, допускающем аналитическое исследование системы.

Единой методики построения математических моделей не существует. Это обусловлено большим разнообразием классов систем [1]:

- статические и динамические;

- структурным или программным управлением;
- постоянной и переменной структурой;
- постоянным (жестким) или сменным (гибким) программным управлением.

По характеру входных воздействий и внутренних состояний системы подразделяются:

- непрерывные и дискретные;
- линейные и нелинейные;
- стационарные и нестационарные;
- детерминированные и стохастические.

Построение модели, отражающей статику системы (состав компонентов и структуру связей) не вызывает больших затруднений. Для динамической системы статику необходимо дополнить описанием работы системы.

1.3 Основные этапы моделирования

Для моделирования необходимо создать модель и провести ее исследование. Некоторые математические модели могут быть исследованы без применения средств вычислительной техники. В настоящее время это практически исключено.

Моделирование на ЭВМ предполагает выполнение следующих этапов:

- 1) формулирование цели моделирования;
- 2) разработка концептуальной модели;
- 3) подготовка исходных данных;
- 4) разработка математической модели;
- 5) выбор метода моделирования;
- 6) выбор средств моделирования;
- 7) разработка программной модели;
- 8) проверка адекватности и корректировка модели;
- 9) планирование экспериментов;
- 10) моделирование на ЭВМ, анализ результатов моделирования.

1.4 Создание концептуальной модели

1. Ориентация.

При разработке модели выделяются следующие этапы описания: концептуальный, математический, программный [1,2]. Концептуальная (содержательная) модель в словесной форме определяет состав и структуру системы, свойства компонентов и причинно-следственные связи между ними. Здесь приводятся сведения

и природе и параметрах элементарных явлений исследуемой системы, о виде и степени взаимодействия между ними, о месте и значении каждого явления в общем процессе функционирования системы.

Процесс создания концептуальной модели никогда не будет формализован, поэтому иногда говорят, что моделирование является не только наукой, но и искусством.

2. Стратификация

Стратификация - это выбор уровня детализации модели. Уровни детализации иногда называют стратами. Выбор уровня детализации часто определяется параметрами, допускающими варьирование в процессе моделирования. Такие параметры обеспечивают определение интересующих характеристик. Остальные параметры должны быть, по возможности, исключены из модели.

3. Детализация

Здесь вводится понятие элементарной операции, для которой известны и могут быть получены зависимости выходных параметров от входных. Если при этом получается модель большой размерности, то ее можно преобразовать в иерархическую модульную структуру. Каждый модуль такой структуры состоит из совокупности модулей более низких рангов, в том числе и элементарных операций.

4. Структуризация. Управление.

Связи между компонентами системы могут быть вещественными и информационными. Вещественные отражают возможные пути перемещения продукта преобразования от одного элемента к другому. Информационные связи обеспечивают передачу между компонентами управляющих воздействий и информации о состоянии. В простых системах информационные связи могут отсутствовать, что соответствует принципу структурного управления.

В более сложных системах управление включает указания, какому компоненту какой исходный объект когда и откуда взять, какую операцию по преобразованию выполнить и куда передать. Такие системы функционируют в соответствии с программным или алгоритмическим принципом управления. В концептуальной модели должны быть конкретизированы все решающие правила или алгоритмы управления рабочей нагрузкой, компонентами и процессами.

5. Локализация

На этапе локализации осуществляется представление внешней среды в виде генераторов внешних воздействий, включаемых в состав модели в качестве компонентов. Сюда входят генераторы рабочей нагрузки, генераторы управляющих и возмущающих воздействий.

Приемники выходных воздействий обычно не включают в модель.

6. Выделение процессов

Функционирование системы заключается в выполнении технологических процессов преобразования вещества, энергии или информации. В сложных системах, как правило, одновременно протекает несколько процессов. Каждый процесс состоит из определенной последовательности отдельных элементарных операций. Часть операций может выполняться параллельно разными активными компонентами системы. Задается технологический процесс одним из видов представления алгоритмов. В системах с программным управлением, обеспечивающих параллельное выполнение нескольких процессов, имеются алгоритмы управления совокупностью параллельно функционирующих процессов.

1.5 Подготовка исходных данных

1. Сбор фактических данных.

Концептуальная модель определяет совокупность параметров S_0 и внешних воздействий X . Для количественных параметров необходимо определить их конкретные значения, которые будут использованы в виде исходных данных при моделировании. Сбор данных должен учитывать следующее [1,2]:

- значения параметров могут быть детерминированными и стохастическими;
- не все параметры являются стационарными;
- речь идет о несуществующей системе (проектируемой, модернизируемой).

Ряд параметров являются случайными величинами по своей природе. Для упрощения модели часть из них представляются детерминированными средними значениями. Это допустимо, если величина имеет небольшой разброс, или, когда цель моделирования достигается при использовании средних значений.

Иногда детерминированные параметры представляются случайной величиной. Например, при многократном выполнении программы количество обрабатываемых данных может изменяться. Всю совокупность вариантов данных можно представить случайной величиной с заданным законом распределения вероятностей.

2. Подбор закона распределения.

Для случайных параметров выявляется возможность представления их теоретическими законами распределения. Процедура подбора вида закона распределения заключается в следующем.

По совокупности значений параметра строится гистограмма

относительных частот - эмпирическая плотность распределения. Гистограмма аппроксимируется плавной кривой, которая сравнивается с кривыми плотности распределения различных теоретических законов распределения. По наилучшему совпадению выбирается один из законов. Далее по эмпирическим значениям вычисляют параметры этого распределения. Проверка совпадения эмпирического и теоретического распределения осуществляется по одному из критериев согласия: Пирсона (хи-квадрат), Колмогорова, Смирнова, Фишера, Стьюдента.

Особую сложность представляет сбор данных по случайным параметрам, зависящим от времени, что характерно для внешних воздействий. Пренебрежение фактами нестационарности параметров существенно влияет на адекватность модели.

3. Аппроксимация функций.

Для каждого компонента системы существует функциональная связь между параметрами входных воздействий и выходными характеристиками. Иногда вид функциональной зависимости может быть легко выявлен. Однако для некоторых компонентов удастся получить лишь экспериментальные данные по входным параметрам и выходным характеристикам. В этом случае вводится некоторая гипотеза о характере функциональной зависимости, то есть аппроксимация ее некоторым математическим уравнением. Поиск математических зависимостей между двумя или более переменными по собранному данным может выполняться с помощью методов регрессионного, корреляционного или дисперсионного анализа. Для выяснения того, насколько точно выбранная зависимость согласуется с опытными данными, используется корреляционный анализ. При проектировании новой системы отсутствует возможность сбора фактических данных. Для таких параметров выдвигаются гипотезы об их возможных значениях. Этап сбора и обработки данных заканчивается классификацией на внешние и внутренние, постоянные и переменные, непрерывные и дискретные, линейные и нелинейные, стационарные и нестационарные, детерминированные и стохастические. Для переменных количественных параметров определяются границы их изменений, а для дискретных - возможные значения.

1.6 Выбор метода моделирования

Математическая модель может быть исследована различными методами - аналитическими или имитационными. В некоторых случаях наличие имитационной модели делает возможным

применение математических методов оптимизации. Для использования аналитических методов необходимо математическую модель преобразовать к виду явных аналитических зависимостей между характеристиками и параметрами системы и внешних воздействий. Однако это удастся лишь для сравнительно простых систем и при наличии хорошо разработанной теории исследуемых объектов. При имитационном моделировании динамические процессы системы - оригинала подменяются процессами, имитируемыми в абстрактной модели, но с соблюдением таких же соотношением длительностей и временных последовательностей отдельных операций. Поэтому метод имитационного моделирования мог бы называться алгоритмическим или операционным. Методы имитационного моделирования различаются в зависимости от класса исследуемых систем, способа продвижения модельного времени и вида количественных переменных параметров системы и внешних воздействий. Методы моделирования разрабатываются для дискретных, непрерывных и смешанных дискретно - непрерывных систем. В зависимости от способа продвижения модельного времени методы моделирования подразделяются на методы с приращением временного интервала и методы с продвижением времени до особых состояний. В первом случае модельное время продвигается на некоторую величину A_r . Далее определяются изменения состояний элементов и выходных воздействий системы, которые произошли за это время. После этого модельное время снова продвигается на величину A_r , и процедура повторяется. Так продолжается до конца периода моделирования T_m . Этот метод моделирования называют «принципом A_r ».

Во втором случае в текущий момент модельного времени t сначала анализируются те будущие особые состояния - поступление дискретного входного воздействия, завершение обслуживания и т.п., для которых определены моменты их наступления $t > t$. Выбирается наиболее раннее особое состояние, и модельное время продвигается до момента наступления этого состояния. Затем анализируется реакция системы на выбранное особое состояние. В частности, в ходе анализа определяется момент наступления нового особого случая. Затем ближайшего. Так продолжается до завершения периода моделирования T_m . Данный метод называют «принципом особых состояний». Метод может использоваться лишь, когда имеется возможность определения моментов наступления будущих очередных особых состояний.

Параметры системы и внешних воздействий могут быть

детерминированными или случайными. По этому признаку различают детерминированное и статистическое моделирование. При статистическом моделировании для получения достоверных вероятностных характеристик процессов функционирования системы требуется их многократное воспроизведение с различными конкретными значениями случайных факторов и статистической обработкой результатов измерений. В основу статистического моделирования положен метод статистических испытаний, или метод Монте-Карло. При разработке математической модели различают также принятую систему формализации - алгоритмический (программный) или структурный (агрегатный) подход. В первом случае процессы управляют компонентами (ресурсами) системы, а во втором - компоненты управляют процессами, определяют порядок функционирования системы [1,2].

1.7 Выбор средств моделирования

1. Технические средства моделирования.

Современные ЭВМ позволяют моделировать сложные распределенные динамические системы. Фактор распределенности играет важную роль и предполагает построение многопроцессорных вычислительных систем на основе локальных вычислительных сетей. Поэтому для моделирования таких систем перспективным представляется использование распределенных многопроцессорных вычислительных систем.

2. Алгоритмические языки общего назначения.

Применимы для аналитических методов моделирования. Первая трудность моделирования заключается в том, что алгоритмы поведения сложных систем являются параллельными, то есть предполагают выполнение более чем одного преобразования в каждый момент времени. Программная имитация параллельных процессов при использовании языков общего назначения сводится к организации псевдопараллельного развития параллельных процессов, что достаточно сложно для программирования.

Вторая трудность состоит в том, что объемы данных в имитационных алгоритмах трудно оценить априорно. Поэтому требуется использовать динамическое распределение памяти, что не всегда обеспечивает язык программирования.

3. Языки моделирования.

При создании программ имитационного моделирования возникают задачи, общие для широкого класса моделей [1,2]:

- организация псевдопараллельного выполнения

алгоритмов;

- динамическое распределение памяти;
- операции с модельным временем, отражающим астрономическое время функционирования оригинала;
- имитация случайных процессов;
- ведение массива событий;
- сбор и обработка результатов моделирования.

Решение перечисленных выше задач осуществляется полностью или частично внутренними средствами языка моделирования.

По структуре и правилам программирования языки моделирования подобны процедурно-ориентированным алгоритмическим языкам высокого уровня. Операторы языков моделирования выполняют более сложные процедуры, поэтому они имеют более высокий уровень и упрощают составление программ. Языки моделирования рассматриваются как формализованный базис для создания математических моделей.

1.8 Выводы по разделу 1

Моделированием называется замещение одного объекта, называемого системой, другим объектом, называемым моделью. Для описания системы необходимо определить ее структурную и функциональную организацию. Область определения модели характеризует диапазон исследуемых вариантов организации системы. Чем шире состав характеристик и параметров, а также область определения модели, тем универсальнее модель в отношении задач, которые можно решать с ее использованием. Модели объектов делятся на два больших класса: материальные (физические) и абстрактные (математические).

Вопросы для самопроверки по разделу 1:

1. Назовите цели моделирования.
2. Дайте определение понятий система и модель.
3. От каких факторов зависит адекватность модели?
4. Назовите основные признаки, необходимые для классификации моделей.
5. Чем определяется сложность модели?
6. Назовите и охарактеризуйте основные этапы моделирования.
7. Перечислите примеры систем автоматизации имитационного моделирования.

2 Математические схемы моделирования систем

2.1 Основные подходы к построению математических моделей систем

Исходной информацией при построении математических моделей (ММ) процессов функционирования систем служат данные о назначении и условиях работы исследуемой (проектируемой) системы *S*. Эта информация определяет основную цель моделирования, требования к ММ, уровень абстрагирования, выбор математической схемы моделирования.

Понятие математическая схема позволяет рассматривать математику не как метод расчёта, а как метод мышления, средства формулирования понятий, что является наиболее важным при переходе от словесного описания к формализованному представлению процесса её функционирования в виде некоторой ММ [1-3].

При пользовании математической схемой в первую очередь исследователя системы должен интересовать вопрос об адекватности отображения в виде конкретных схем реальных процессов в исследуемой системе, а не возможность получения ответа (результата решения) на конкретный вопрос исследования.

Например, представление процесса функционирования информационно-вычислительной сети коллективного пользования в виде сети схем массового обслуживания даёт возможность хорошо описать процессы, происходящие в системе, но при сложных законах входящих потоков и потоков обслуживания не даёт возможности получения результатов в явном виде.

2.2 Общие вопросы моделирования

Моделирование - это замещение одного объекта (оригинала) другим (моделью) и фиксация и изучение свойств модели. Замещение производится с целью упрощения, удешевления, ускорения изучения свойств оригинала [4].

В общем случае объектом-оригиналом может быть естественная или искусственная, реальная или воображаемая система. Она имеет множество параметров S_0 и характеризуется определёнными свойствами. Количественной мерой свойств системы служит множество характеристик Y_0 , система проявляет свои свойства под влиянием внешних воздействий X .

Множество параметров S и их значений отражает её внутреннее содержание - структуру и принципы функционирования.

Характеристики S - это в основном её внешние признаки, которые важны при взаимодействии с другими S .

Характеристики S находятся в функциональной зависимости от её параметров. Каждая характеристика системы $y_0 \in Y_0$ определяется в основном ограниченным числом параметров $\{S_{0k}\} \subset S_0$. Остальные параметры не влияют на значение данной характеристики S . Исследователя интересуют, как правило, только некоторые характеристики S : $\{y\} \subset Y_0$ при конкретных воздействиях на систему $\{x_{mn}\} \subset X$.

Модель — это тоже система со своими множествами параметров S_m и характеристик Y_m . Оригинал и модель сходны по одним параметрам и различны по другим. Замещение одного объекта другим правомерно если интересующие исследователя характеристики оригинала и модели определяются однотипными подмножествами параметров и связаны одинаковыми зависимостями с этими параметрами [4]:

$$y_{ok} = f(\{S_{oi}\}, \{x_{on}\}, T); \quad (2.1)$$

$$y_{mn} = f(\{S_{mi}\}, \{x_{mn}\}, T_m) \quad (2.2)$$

где, y_{mn} - k -ая характеристика модели, $y_{mn} \in Y_m$
 x_{mn} - внешнее воздействие на модель, $x_{mn} \subset X$
 T_m - модельное время.

При этом $s_{oi} = \Psi(S_{mi})$; $x_{on} = \omega(x_{mn})$, $T = mT_m$ (где m - масштабный коэффициент) на всём интервале $[0-T_m]$ или в отдельные периоды времени. Тогда с некоторым приближением можно сделать вывод о том, что характеристики O_p , связаны с характеристиками M зависимостями $y_{ok} = \varphi(y_{mk})$. Множество характеристик модели $Y_{mk} = \{y_{mk}\}$ является отображением множества интересующих характеристик оригинала $y_{ok} = \{y_{ok}\}$, т.е. $\varphi: Y_{ok} \rightarrow Y_{mk}$, т.е. $\varphi: Y_{ok} \rightarrow Y_{mk}$.

При исследовании сложных естественных S , у которых известны Y_{ok} , но мало изучен состав элементов и принципы их взаимодействия с помощью моделирования может решаться обратная задача. Строят предположительную модель, определяющая её характеристики Y_{mk} при эквивалентных внешних воздействиях $\{x_{mn}\}$ ($\omega: \{x_{on}\} \rightarrow \{x_{mn}\}$) и, если оказывается, что имеет место отображение $\varphi: Y_{ok} \rightarrow Y_{mk}$ с некоторой известной функцией φ , то считается, что система-оригинал имеет такие же параметры.

Моделирование целесообразно, когда у модели отсутствуют те признаки оригинала, которые препятствуют его исследованию.

Теория моделирования — взаимосвязанная совокупность положений, определений, методов и средств создания моделей. Сами модели являются предметом теории моделирования.

Теория моделирования является основной составляющей общей теории систем - системологии, где в качестве главного принципа постулируются осуществимые модели: система представима конечным множеством моделей, каждая из которых отражает определённую грань её сущности.

2.3 Классификация моделей

1. Физические модели (ФМ). В основу классификации положена степень абстрагирования модели от оригинала. Предварительно все модели можно подразделить на 2 группы - физические и абстрактные (математические) [5].

ФМ обычно называют систему, эквивалентную или подобную оригиналу, но возможно имеющую другую физическую природу. Виды ФМ [5]:

- натуральные;
- квазинатуральные;
- масштабные;
- аналоговые;

2. Натуральные модели — это реальные исследуемые системы (макеты, опытные образцы). Имеют полную адекватность (соответствия) с системой оригиналом, но дороги.

3. Квазинатуральные модели — совокупность натуральных и математических моделей. Этот вид используется тогда, когда модель части системы не может быть математической из-за сложности её описания (модель человека оператора) или когда часть системы должна быть исследована во взаимодействии с другими частями, но их ещё не существует или их включение очень дорого. (вычислительные полигоны, АСУ)

4. Масштабная модель — это система той же физической природы, что и оригинал, но отличается от него масштабами. Методологической основой масштабного моделирования является теория подобия. При проектировании ВС масштабные модели могут использоваться для анализа вариантов компоновочных решений.

5. Аналоговыми моделями называют системы, имеющие физическую природу, отличающуюся от оригинала, но сходные с оригиналом процессы функционирования. Для создания аналоговой модели требуется наличие математического описания изучаемой системы. В качестве аналоговых моделей используются механические, гидравлические, пневматические и электрические системы. Аналоговое моделирование использует при исследовании средства ВТ на уровне логических элементов и электрических цепей, а так же на

системном уровне, когда функционирование системы описывается например, дифференциальными или алгебраическими уравнениями.

6. Математические модели (ММ). Математические модели представляют собой формализованное представление системы с помощью абстрактного языка, с помощью математических соотношений, отражающих процесс функционирования системы. Для составления математических моделей можно использовать любые математические средства — алгебраическое, дифференциальное, интегральное исчисления, теорию множеств, теорию алгоритмов и т.д. По существу вся математика создана для составления и исследования моделей объектов и процессов.

К средствам абстрактного описания систем относятся также языки химических формул, схем, чертежей, карт, диаграмм и т.п. Выбор вида модели определяется особенностями изучаемой системы и целями моделирования, т.к. исследование модели позволяет получить ответы на определённую группу вопросов. Для получения другой информации может потребоваться модель другого вида. Математические модели можно классифицировать на детерминированные и вероятностные, аналитические, численные и имитационные.

Аналитической моделью называется такое формализованное описание системы, которое позволяет получить решение уравнения (2.2) в явном виде, используя известный математический аппарат.

Численная модель характеризуется зависимостью (2.2) такого вида, который допускает только частные решения для конкретных начальных условий и количественных параметров моделей.

Имитационная модель (ИМ) - это совокупность описания системы и внешних воздействий, алгоритмов функционирования системы или правил изменения состояния системы под влиянием внешних и внутренних возмущений. Эти алгоритмы и правила не дают возможности использования имеющихся математических методов аналитического и численного решения, но позволяют имитировать процесс функционирования системы и производить вычисления интересующих характеристик. Имитационные модели могут быть созданы для гораздо более широкого класса объектов и процессов, чем аналитические и численные. Поскольку для реализации имитационных моделей служат ВС, средствами формализованного описания ИМ служат универсальные и специальные алгоритмические языки. ИМ в наибольшей степени подходят для исследования ВС на системном уровне.

2.4 Основные подходы к построению ММ систем

Исходной информацией при построении ММ процессов функционирования систем служат данные о назначении и условиях работы исследуемой (проектируемой) системы S . Эта информация определяет основную цель моделирования, требования к ММ, уровень абстрагирования, выбор математической схемы моделирования [6].

Понятие математическая схема позволяет рассматривать математику не как метод расчёта, а как метод мышления, средства формулирования понятий, что является наиболее важным при переходе от словесного описания к формализованному представлению процесса её функционирования в виде некоторой ММ.

При пользовании мат. схемой в первую очередь исследователя системы должен интересовать вопрос об адекватности отображения в виде конкретных схем реальных процессов в исследуемой системе, а не возможность получения ответа (результата решения) на конкретный вопрос исследования.

Например, представление процесса функционирования ИВС коллективного пользования в виде сети схем массового обслуживания даёт возможность хорошо описать процессы, происходящие в системе, но при сложных законах входящих потоков и потоков обслуживания не даёт возможности получения результатов в явном виде.

Математическую схему можно определить как звено при переходе от содержательного к формализованному описанию процесса функционирования системы с учётом воздействия внешней среды. Т.е. имеет место цепочка: описательная модель - математическая схема - имитационная модель.

Каждая конкретная система S характеризуется набором свойств, под которыми понимаются величины, отображающие поведение моделируемого объекта (реальной системы) и учитываются условия её функционирования во взаимодействии с внешней средой (системой) E .

При построении ММ системы S необходимо решить вопрос о её полноте. Полнота моделирования регулируется, в основном, выбором границ «Система S - среда E ». Также должна быть решена задача упрощения ММ, которая помогает выделить основные свойства системы, отбросив второстепенные в плане цели моделирования.

ММ объекта моделирования, т.е. системы S можно представить в виде множества величин, описывающих процесс функционирования реальной системы и образующих в общем случае следующие подмножества:

- совокупность X - входных воздействий на S $x_i \in X, i=1 \dots n_x$;

- совокупность воздействий внешней среды $v_l \in V, l=1 \dots n_v$;
- совокупность внутренних (собственных) параметров системы $h_k \in H, k=1 \dots n_h$;
- совокупность выходных характеристик системы $y_j \in Y, j=1 \dots n_y$.

В перечисленных множествах можно выделить управляемые и неуправляемые величины. В общем случае X, V, H, Y не пересекаемые множества, содержат как детерминированные так и стохастические составляющие. Входные воздействия E и внутренние параметры S являются независимыми (экзогенными) переменными, $\bar{X}(t); \bar{V}(t); \bar{H}(t)$. Выходные характеристики - зависимые переменные (эндогенные) $\bar{Y}(t)$. Процесс функционирования S описывается оператором F_S :

$$\bar{Y}(t) = F_S(\bar{X}, \bar{V}, \bar{H}, t) \quad (2.3)$$

$\bar{Y}(t)$ - выходная траектория. F_S - закон функционирования S . F_S может быть функция, функционал, логические условия, алгоритм, таблица или словесное описание правил.

Алгоритм функционирования A_S - метод получения выходных характеристик $\bar{Y}(t)$ с учётом входных воздействий $\bar{X}(t); \bar{V}(t); \bar{H}(t)$. Очевидно один и тот же F_S может быть реализован различными способами, т.е. с помощью множества различных A_S .

Соотношение (1) является математическим описанием поведения объекта S моделирования во времени t , т.е. отражает его динамические свойства. (2.3) - это динамическая модель системы S . Для статических условий ММ есть отображения X, V, H в Y , т.е.

$$\bar{Y} = f(\bar{X}, \bar{V}, \bar{H}) \quad (2.4)$$

Соотношения (1), (2) могут быть заданы формулами, таблицами и т.д.

Также соотношения в ряде случаев могут быть получены через свойства системы в конкретные моменты времени, называемые состояниями.

Состояния системы S характеризуются векторами:

$\bar{Z}^I(\bar{z}_1^I, \dots, \bar{z}_k^I)$ и $\bar{Z}^{II}(\bar{z}_1^{II}, \dots, \bar{z}_k^{II})$, где $\bar{z}_1^I = z_1(t^I) \dots \bar{z}_k^I = z_k(t^I)$ в момент $t^I \in (t_0, T)$

$\bar{z}_1^{II} = z_1(t^{II}) \dots \bar{z}_k^{II} = z_k(t^{II})$ в момент $t^{II} \in (t_0, T)$ и т.д. $k=1 \dots n_Z$.

$Z_1(t), Z_2(t) \dots Z_k(t)$ - это координаты точки в k -мерном фазовом пространстве. Каждой реализации процесса будет соответствовать некоторая фазовая траектория.

Совокупность всех возможных значений состояний $\{\bar{Z}\}$ называется пространством состояний объекта моделирования Z , причём $z_k \in Z$.

Состояние системы S в интервале времени $t_0 < t \leq T^1$ полностью определяется начальными условиями $\bar{Z}^0 = (z_1^0, \dots, z_k^0)$, где $z_1^0 = z_1(t_0), \dots$ входными $\bar{X}(t)$, внутренними параметрами $\bar{H}(t)$ и воздействиями внешней среды $\bar{V}(t)$, которые имели место за промежуток времени $t^* - t_0$ с помощью 2-х векторных уравнений [6,7]:

$$\bar{Z}(t) = \Phi(\bar{Z}^0, \bar{X}, \bar{V}, \bar{h}, t); \quad (2.5)$$

$$Y(t) = F(Z, t). \quad (2.6)$$

иначе: $Y(t) = F(\Phi(\bar{Z}^0, \bar{X}, \bar{V}, \bar{h}, t))$.

Время в мод. S может рассматриваться на интервале моделирования (t_0, T) как непрерыв., так и дискретное, т.е. квантованное на отрезке длин. Δt .

Таким образом под ММ объекта понимаем конечное множество переменных $\{\bar{X}, \bar{Z}, \bar{h}\}$ вместе с математическими связями между ними и характеристиками $\bar{Y}$.

Моделирование называется детерминированным, если операторы F, Φ детерминированные, т.е. для конкретного входа выход детерминированный. Детерминированное моделирование - частный случай стохастического моделирования. В практике моделирование объектов в области системного анализа на первичных этапах исследования рациональнее использовать типовые математические схемы: диф. уравнения, конечные и вероятностные автоматы, СМО и т.д.

Не облад. такой степенью общности, как модели (2.4), (2.5), типовые математические схемы имеют преимущество простоты и наглядности, но при существенном сужении возможности применения.

В качестве детерминированных моделей, когда при исследовании случайный факт не учитывается, для представления систем, функционирующих в непрерывном времени, используются дифференциальные, интегральные и др. уравнения, а для представления систем, функционирующих в дискретном времени - конечные автоматы и конечно разностные схемы.

В начале стохастических моделей (при учёте случайного фактора) для представления систем с дискретным временем используются вероятностные автоматы, а для представления систем с непрерывным временем — системы массового обслуживания (СМО).

Большое практическое значение при исследовании сложных индивидуальных управленческих систем, к которым относятся АСУ, имеют так называемые агрегативные модели.

Агрегативные модели (системы) позволяют описать широкий круг объектов исследования с отображением системного характера этих объектов. Именно при агрегативном описании сложный объект расчленяется на конечное число частей (подсистем), сохраняя при этом связи, обеспечивая взаимодействие частей.

2.5 Непрерывно детерминированные модели (Д - схемы).

Рассмотрим особенности непрерывно детерминированного подхода на примере, используя в качестве ММ дифференциальные уравнения [7].

Дифференциальными уравнениями называются такие уравнения, в которых неизвестными будут функции одной переменной или нескольких переменных, причём в уравнение входят не только их функции но их производные различных порядков.

Если неизвестные - функции многих переменных, то уравнения называются - уравнения в частных производных. Если неизвестные функции одной независимой переменной, то имеют место обыкновенные дифференциальные уравнения.

Математическое соотношение для детерминированных систем в общем виде:

$$\vec{y}' = \vec{f}(\vec{y}, t), \vec{y}(t_0) = \vec{y}_0 \quad (2.7).$$

Например, процесс малых колебаний маятника описан обыкновенными дифференциальным уравнением

$$m_1 l_1^2 \frac{\partial^2 \Theta(t)}{\partial t^2} + m_2 g l \Theta(t) = 0 \quad \text{где } m_1, l_1 - \text{масса, длина подвески маятника,}$$

Θ - угол отклонения маятника от положения равновесия. Из этого уравнения можно найти оценки интересующих характеристик, например период колебаний $T = 2\pi\sqrt{l/g}$

Диф. уравнения, Д - схемы являются математическим аппаратом теории систем автоматического регулирования, управления.

При проектировании и эксплуатации систем САУ необходимо выбрать такие параметры системы, которые бы обеспечивали требуемую точность управления.

Следует отметить, что часто используемые в САУ системы диф. уравнений определяются путём линеаризацией управления

объекта (системы), более сложного вида, имеющего нелинейности:

$$F(y^n, y^{n-1}, \dots, y, x^m, x^{m-1}, \dots, x_n) = 0:$$

$$\frac{dF}{dy^n} \Delta y^n + \frac{dF}{dy^{n-1}} \Delta y^{n-1} \dots \frac{dF}{dy_0} \Delta y + \Delta y = \frac{dF}{dx_0^m} \Delta x^m + \dots \frac{dF}{dx_0} \Delta x + \Delta x$$

2.6 Дискретно – детерминированные модели (F-схемы)

ДДМ являются предметом рассмотрения теории автоматов (ТА). ТА - раздел теоретической кибернетики, изучающей устройства, перерабатывающие дискретную информацию и меняющего свои внутренние состояния лишь в допустимые моменты времени.

Конечный автомат имеет множество внутренних состояний и входных сигналов, являющихся конечными множествами. Автомат задаётся F- схемой: $F = \langle z, x, y, \varphi, \psi, z_0 \rangle$, где z, x, y - соответственно конечные множества входных, выходных сигналов (алфавитов) и конечное множество внутренних состояний (алфавита).

$z_0 \in Z$ - начальное состояние; $\varphi(z, x)$ - функция переходов;

$\psi(z, x)$ - функция выхода.

Автомат функционирует в дискретном автоматном времени, моментами которого являются такты, т.е. примыкающие друг к другу равные интервалы времени, каждому из которых соответствуют постоянные значения входного, выходного сигнала и внутреннего состояния. Абстрактный автомат имеет один входной и один выходной каналы.

В момент t , будучи в состоянии $z(t)$, автомат способен воспринять сигнал $x(t)$ и выдать сигнал $y(t) = \psi[z(t), x(t)]$, переходя в состояние $z(t+1) = \varphi[z(t), z(t)]$, $z(t) \in Z$; $y(t) \in Y$; $x(t) \in X$. Абстрактный КА в начальном состоянии z_0 принимая сигналы $x(0), x(1), x(2) \dots$ выдаёт сигналы $y(0), y(1), y(2) \dots$ (выходное слово).

Существуют F- автомат 1-ого рода (Миля), функционирующий по схеме:

$$z(t+1) = \varphi[z(t), z(t)], t=0, 1, 2, \dots \quad (2.8)$$

$$y(t) = \psi[z(t), x(t)], t=0, 1, 2, \dots \quad (2.9)$$

F- автомат 2-ого рода:

$$z(t+1) = \varphi[z(t), z(t)], t=0, 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

$$y(t) = \psi[z(t), x(t-1)], t=1, 2, 3, \dots \quad (2.11)$$

Автомат 2-ого рода, для которого:

$$y(t) = \psi[z(t)], t=0, 1, 2, \quad (2.12)$$

т.е. функция выходов не зависит от входной переменной $x(t)$, называется автоматом Мура.

Т.о. уравнения 2.8 – 2.12 полностью задающие F- автомат, являются частным случаем уравнения

$$\vec{z}(t) = \Phi(\vec{z}_0, \vec{x}, \vec{v}, \vec{h}, t) \quad (2.13)$$

где $\vec{z}$ - вектор состояния, $\vec{x}$ - вектор независимых входных переменных, $\vec{v}$ - вектор воздействий внешней среды, $\vec{h}$ - вектор собственных внутренних параметров системы, $\vec{z}_0$ - вектор начального состояния, t - время; и уравнение $\vec{y}(t) = F(\vec{z}, t)$, когда система S - денормированная и на её вход поступает дискретный сигнал x .

По числу состояний конечные автоматы бывают с памятью и без памяти. Автоматы с памятью имеют более одного состояния, а автоматы без памяти (комбинационные или логические схемы) обладают лишь одним состоянием. При этом согласно (2), работа комбинационной схемы заключается в том, что она ставит в соответствие каждому входному сигналу $x(t)$ определённый выходной сигнал $y(t)$, т.е. реализует логическую функцию вида: $y(t) = \psi[x(t)]$, $t=0,1,2,\dots$

Эта функция называется булевой, если алфавиты X и Y , которым принадлежат значения сигналов x и y состоят из 2-х букв.

По характеру отсчёта времени (дискретному) F- автоматы делятся на синхронные и асинхронные. В синхронных автоматах моменты времени, в которые автомат «считывает» входные сигналы, определяются принудительно синхронизирующими сигналами. Реакция автомата на каждое значение входного сигнала заканчивается за один такт синхронизации. Асинхронный F- автомат считывает входной сигнал непрерывно и поэтому, реагируя на достаточно длинный водной сигнал постоянной величины x , он может, как это следует из 2.8 – 2.12, несколько раз изменить своё состояние, выдавая соответствующее число выходных сигналов, пока не перейдёт в устойчивое [7].

Для задания F- автомата необходимо описать все элементы множества $F = \langle z, x, y, \phi, \psi, z_0 \rangle$, т.е. входной, внутренний и выходной алфавиты, а также функции переходов и выходов. Для задания работы F- автоматов наиболее часто используются табличный, графический и матричный способ.

В табличном способе задания используется таблицы переходов и выходов, строки которых соответствуют входным сигналам автомата, а столбцы - его состояниям. При этом обычно 1-ый столбец слева соответствует начальному состоянию z_0 . На пересечении i -ой строки и j -ого столбца таблицы переходов помещается

соответствующее значение $\varphi(z_k, x_i)$ функции переходов, а в таблице выходов - $\psi(z_k, x_i)$ функции выходов. Для F- автомата Мура обе таблицы можно совместить, получив т.н. отмеченную таблицу переходов, в которой над каждым состоянием z_k автомата, обозначающим столбец таблицы, стоит соответствующий этому состоянию, согласно (2.12), выходной сигнал $\psi(z_i)$.

Описание работы F- автомата Мили таблицами переходов φ и выходов ψ иллюстрируется таблицей (1), а описание F- автомата Мура - таблицей переходов (2).

Таблица 1

x_j	z_k			
	z_0	z_1	...	z_k
Переходы				
x_1	$\varphi(z_0, x_1)$	$\varphi(z_1, x_1)$	...	$\varphi(z_k, x_1)$
x_2	$\varphi(z_0, x_2)$	$\varphi(z_1, x_2)$	...	$\varphi(z_k, x_2)$
.....				
x_l	...	...	...	...
Выходы				
x_1	$\psi(z_0, x_1)$	$\psi(z_1, x_1)$	...	$\psi(z_k, x_1)$
.....				
x_l	$\psi(z_0, x_l)$	$\psi(z_1, x_l)$	...	$\psi(z_k, x_l)$

Таблица 2

x_i	$\psi(z_k)$			
	$\psi(z_0)$	$\psi(z_1)$	...	$\psi(z_k)$
	z_0	z_1	...	z_k
x_1	$\varphi(z_0, x_1)$	$\varphi(z_1, x_1)$	...	$\varphi(z_k, x_1)$
x_2	$\varphi(z_0, x_2)$	$\varphi(z_1, x_2)$	...	$\varphi(z_k, x_2)$
.....				
x_l	$\varphi(z_0, x_l)$	$\varphi(z_1, x_l)$	...	$\varphi(z_k, x_l)$

Примеры табличного способа задания F- автомата Мили F1 с тремя состояниями, двумя входными и двумя выходными сигналами приведены в таблице 3, а для F- автомата Мура F2 - в таблице 4.

Таблица 3

x_j	z_0		
	z_0	z_1	z_2
Переходы			
x_1	z_2	z_0	z_0
x_2	z_0	z_2	z_1
Выходы			
x_1	y_1	y_1	y_2
x_2	y_1	y_2	y_1

Таблица 4

x_i	y				
	y_1	y_1	y_3	y_2	y_3
	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4
x_1	z_1	z_4	z_4	z_2	z_2
x_2	z_3	z_1	z_1	z_0	z_0

При другом способе задания конечного автомата используется понятие направленного графа. Граф автомата представляет собой набор вершин, соответствующих различным состояниям автомата и соединяющих вершин дуг графа, соответствующих тем или иным переходам автомата. Если входной сигнал x_k вызывает переход из состояния z_i в состояние z_j , то на графе автомата дуга, соединяющая вершину z_i с вершиной z_j обозначается x_k . Для того, чтобы задать функцию переходов, дуги графа необходимо отметить соответствующими выходными сигналами. Для автоматов Мили эта разметка производится так: если входной сигнал x_k действует на состояние z_i , то согласно сказанному получается дуга, исходящая из z_i и помеченная x_k ; эту дугу дополнительно отмечают выходным сигналом $y = \psi(z_i, x_k)$. Для автомата Мура аналогичная разметка графа такова: если входной сигнал x_k , действуя на некоторое состояние автомата, вызывает переход в состояние z_j , то дугу, направленную в z_j и помеченную x_k , дополнительно отмечают выходным сигналом $y = \psi(z_j, x_k)$. На рис. 1 приведены заданные ранее таблицами F-автоматы Мили F1 и Мура F2 соответственно [8].

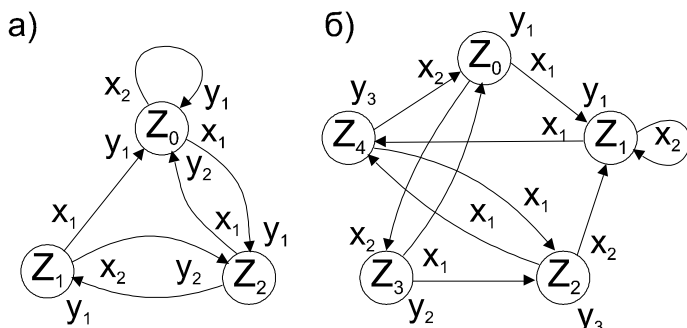


Рис. 2.1 - Графы автоматов Мили (а) и Мура (б).

При решении задач моделирования часто более удобной формой является матричное задание конечного автомата. При этом матрица соединений автомата есть квадратная матрица $C = \|c_{ij}\|$, строки которой соответствуют исходным состояниям, а столбцы - состояниям перехода. Элемент $c_{ij} = x_k/y_s$ в случае автомата Мили соответствует входному сигналу x_k , вызывающему переход из состояния z_i в состояние z_j и выходному сигналу y_s , выдаваемому при этом переходе. Для автомата Мили F1, рассмотренного выше, матрица соединений имеет вид:

$$C_1 = \begin{pmatrix} x_2/y_1 & - & x_1/y_1 \\ x_1/y_1 & - & x_2/y_2 \\ x_1/y_2 & x_2/y_1 & - \end{pmatrix}$$

Если переход из состояния z_i в состояние z_j происходит под действием нескольких сигналов, элемент матрицы c_{ij} представляет собой множество пар «вход/выход» для этого перехода, соединённых знаком дизъюнкции. Для F-автомата Мура элемент c_{ij} равен множеству входных сигналов на переходе $(z_i z_j)$, а выход описывается:

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} \Psi(z_0) \\ \Psi(z_1) \\ \dots \\ \Psi(z_k) \end{bmatrix}$$

i -ая компонента которого выходной сигнал, отмечающий состояние z_i .

2.7 Непрерывно-стохастические модели (Q - схемы)

К ним относятся системы массового обслуживания (англ. queuing system), которые называют Q-схемами [8].

Предмет ТМО - системы массового обслуживания (СМО) и сети массового обслуживания. Под СМО понимают динамическую систему, предназначенную для эффективного обслуживания

случайного потока заявок при ограниченных ресурсах системы. Обобщённая структура СМО приведена на рис. 2.3.

Поступающие на вход СМО однородные заявки в зависимости от порождающей причины делятся на типы, интенсивность потока заявок типа i ($i=1 \dots M$) обозначено λ_i . Совокупность заявок всех типов - входящий поток СМО. Обслуживание заявок выполняется m каналами. Различают универсальные и специализированные каналы обслуживания. Для универсального канала типа j считается известными функции распределения $F_{ji}(\tau)$ длительности обслуживания заявок произвольного типа. Для специализированных каналов функции распределения длительности обслуживания каналов заявок некоторых типов являются неопределёнными, назначение этих заявок на данный канал. В качестве процесса обслуживания могут быть представлены различные по своей физической природе процессы функционирования экономических, производственных, технических и других систем, например, потоки поставок продукции некоторому предприятию, потоки деталей и комплектующих изделий на сборочном конвейере цеха, заявки на обработку информации ЭВМ от удалённых терминалов и т.д. При этом характерным для работы таких объектов является случайное поведение заявок (требований) на обслуживание и завершение обслуживания в случайные моменты времени.

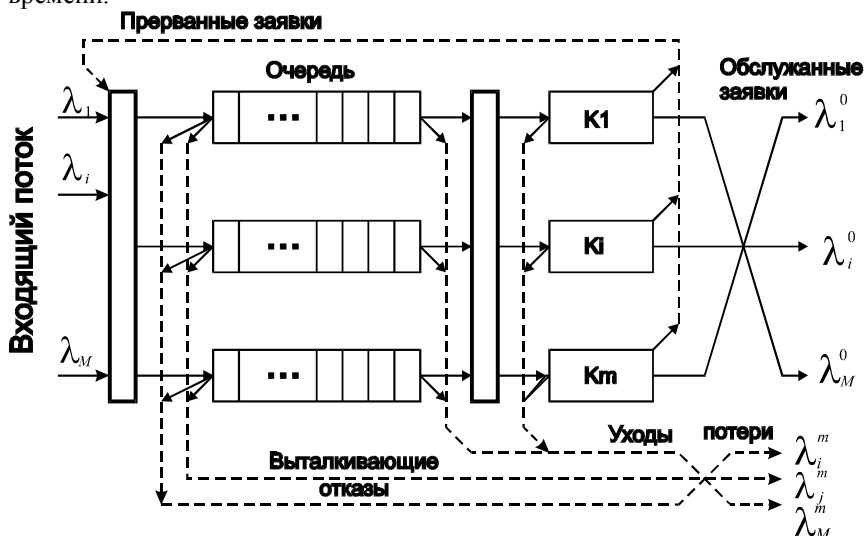


Рис. 2.3 - Схема СМО

Q - схемы можно исследовать аналитически и имитационными моделями. Последнее обеспечивает большую универсальность.

В любом элементарном акте обслуживания можно выделить две основные составляющие: ожидание обслуживания заявкой и собственно обслуживание заявки. Это можно отобразить в виде некоторого i -ого прибора обслуживания Π_i , состоящего из накопителя заявок, в котором может находиться одновременно $l_i=0 \dots L_iH$ заявок, где L_iH - ёмкость i -ого накопителя, и канала обслуживания заявок, k_i .

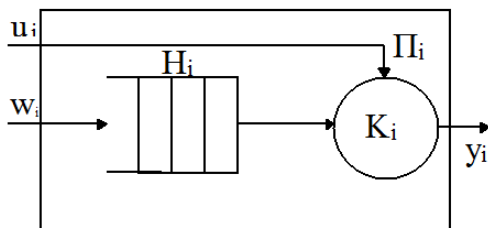


Рис. 2.4 - Схема прибора СМО

На каждый элемент прибора обслуживания Π_i поступают потоки событий: в накопитель H_i поток заявок w_i , на канал k_i - поток обслуживания u_i .

Потоком событий (ПС) называется последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то случайные моменты времени. Различают потоки однородных и неоднородных событий. Однородный ПС характеризуется только моментами поступления этих событий (вызывающими моментами) и задаётся последовательностью $\{t_n\} = \{0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n \leq \dots\}$, где t_n - момент поступления n -ого события - неотрицательное вещественное число. ОПС может быть также задан в виде последовательности промежутков времени между n -ым и $n+1$ -ым событиями $\{t_n\}$.

Неоднородным ПС называется последовательность $\{t_n, f_n\}$, где t_n - вызывающие моменты; f_n - набор признаков события. Например, может быть задана принадлежность к тому или иному источнику заявок, наличие приоритета, возможность обслуживания тем или иным типом канала и т.п.

Рассмотрим ОПС, для которого $t_i \in \{t_n\}$ - случайные величины, независимые между собой. Тогда ПС называется потоком с ограниченным последствием [9].

ПС называется ординарным, если вероятность того, что на малый интервал времени Δt , примыкающий к моменту времени t попадает больше одного события $P \geq 1(t, \Delta t)$ пренебрежительно мала.

Если для любого интервала Δt событие $P_0(t, \Delta t) + P_1(t, \Delta t) + P_{\geq 1}(t, \Delta t) = 1$, $P_1(t, \Delta t)$ - вероятность попадания на интервал Δt ровно одного события. Как сумма вероятностей событий, образующих полную группу и несовместных, то для ординарного потока событий $P_0(t, \Delta t) + P_1(t, \Delta t) \approx 1$, $P_{\geq 1}(t, \Delta t) = \Theta(\Delta t)$, где $\Theta(\Delta t)$ - величина, порядок малости который выше, чем Δt , т.е. $\lim(\Theta(\Delta t)) = 0$ при $\Delta t \rightarrow 0$.

Стационарным ПС называется поток, для которого вероятность появления того или иного числа событий на интервале времени τ зависит от длины этого участка и не зависит от того, где на оси времени $0 - t$ взят этот участок. Для ОПС справедливо $0 * P_0(t, \Delta t) + 1 * P_1(t, \Delta t) = P_1(t, \Delta t)$ - среднее число событий на интервале Δt . Среднее число событий, наступающих на участке Δt в единицу времени составляет $P_1(t, \Delta t) / \Delta t$. Рассмотрим предел этого выражения при $\Delta t \rightarrow 0$ $\lim P_1(t, \Delta t) / \Delta t = \lambda(t) * (1/\text{един.вр.})$.

Если этот предел существует, то он называется интенсивностью (плотностью) ОПС. Для стандартного ПС $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$.

Применительно к элементарному каналу обслуживания k_i можно считать что поток заявок $w_i \in W$, т.е. интервалы времени между моментами появления заявок на входе k_i образуют подмножество неуправляемых переменных, а поток обслуживания $u_i \in U$, т.е. интервалы времени между началом и окончанием обслуживания заявки образуют подмножество управляемых переменных [8].

Заявки, обслуженные каналом k_i и заявки, покинувшие прибор Π_i по различным причинам не обслуженными, образуют выходной поток $y_i \in Y$.

Процесс функционирования прибора обслуживания Π_i можно представить как процесс изменения состояний его элементов во времени $Z_i(t)$. Переход в новое состояние для Π_i означает изменение кол-ва заявок, которые в нём находятся (в канале k_i и накопителе N_i). Т.о. вектор состояний для Π_i имеет вид : $\vec{Z}_i = (z_i^H, z_i^K)$, где z_i^H - состояния накопителя, ($z_i^H = 0$ - накопитель пуст, $z_i^H = 1$ - в накопителе одна заявка..., $z_i^H = L_i^H$ - накопитель занят полностью; z_i^K - состояние канала k_i ($z_i^K = 0$ - канал свободен, $z_i^K = 1$ канал занят).

Q-схемы реальных объектов образуются композицией многих элементарных приборов обслуживания Π_i . Если k_i различных приборов обслуживания соединены параллельно, то имеет место многоканальное обслуживание (многоканальная Q-схема), а если приборы Π_i и их параллельные композиции соединены

последовательно, то имеет место многофазное обслуживание (многофазная Q-схема).

Для задания Q-схемы необходимо оператор сопряжения R, отражающий взаимосвязь элементов структуры.

Связи в Q-схеме изображают в виде стрелок (линий потока, отражающих направление движения заявок). Различают разомкнутые и замкнутые Q-схемы. В разомкнутой выходной поток не может снова поступить на какой-либо элемент, т.е. обратная связь отсутствует.

Собственными (внутренними) параметрами Q-схемы будут являться количество фаз $L\Phi$, количество каналов в каждой фазе, L_{kj} , $j=1 \dots L\Phi$, количество накопителей каждой фазы L_{kj} , $k=1 \dots L\Phi$, ёмкость i -ого накопителя $L_i H$. Следует отметить, что в теории массового обслуживания в зависимости от ёмкости накопителя применяют следующую терминологию [9]:

- системы с потерями ($L_i H=0$, накопитель отсутствует);
- системы с ожиданием ($L_i H \rightarrow \infty$);
- системы с ограниченной ёмкостью накопителя H_i (смешанные).

Обозначим всю совокупность собственных параметров Q-схемы как подмножество H .

Для задания Q-схемы также необходимо описать алгоритмы её функционирования, которые определяют правила поведения заявок в различных неоднозначных ситуациях.

В зависимости от места возникновения таких ситуаций различают алгоритмы (дисциплины) ожидания заявок в накопителе H_i и обслуживания заявок каналом k_i . Неоднородность потока заявок учитывается с помощью введения класса приоритетов.

В зависимости от динамики приоритетов Q-схемы различают статические и динамические. Статические приоритеты назначаются заранее и не зависят от состояний Q-схемы, т.е. они являются фиксированными в пределах решения конкретной задачи моделирования. Динамические приоритеты возникают при моделировании. Исходя из правил выбора заявок из накопитель H_i на обслуживание каналом k_i можно выделить относительные и абсолютные приоритеты.

Относительный приоритет означает, что заявка с более высоким приоритетом, поступившая в накопитель H , ожидает окончания обслуживания представляющей заявки каналом k_i и только после этого занимает канал.

Абсолютный приоритет означает, что заявка с более высоким приоритетом, поступившая в накопитель, прерывает обслуживание

каналом k_i заявки с более низким приоритетом и сами занимает канал (при этом вытесненная из k_i заявка может либо покинуть систему, либо может быть снова записана на какое-то место в H_i).

Необходимо также знать набор правил, по которым заявки покидают H_i и k_i : для H_i – либо правила переполнения, либо правила ухода, связанные с истечением времени ожидания заявки в H_i ; для k_i – правила выбора маршрутов или направлений ухода. Кроме того, для заявок необходимо задать правила, по которым они остаются в канале k_i , т.е. правила блокировок канала.

При этом различают блокировки k_i по выходу и по входу. Такие блокировки отражают наличие управляющих связей в Q-схеме, регулирующих поток заявок в зависимости от состояний Q-схемы. Набор возможных алгоритмов поведения заявок в Q-схеме можно представить в виде некоторого оператора алгоритмов поведения заявок A .

Вопросы для самопроверки по разделу 2:

1. Какая исходная информация необходима для построения математических моделей процессов функционирования систем?
2. Дайте определение понятия математическая схема.
3. Дайте определения агрегативной модели и охарактеризуйте её значение для исследования индивидуальных управленческих систем.
4. Дайте понятие и охарактеризуйте непрерывно-детерминированную модель.
5. Дайте понятие и охарактеризуйте дискретнодетерминированную модель.
6. Дайте понятие и охарактеризуйте непрерывно-стохастическую модель.

3 Имитационное моделирование систем

3.1 Измеряемые характеристики моделируемых систем

При имитационном моделировании можно измерять значения любых характеристик, интересующих исследователя. Обычно по результатам вычислений определяются характеристики всей системы, каждого потока и устройства [10].

Для всей системы производится подсчёт поступивших в систему заявок, полностью обслуженных и покинувших систему заявок без обслуживания по тем или иным причинам. Соотношения этих величин характеризует производительность системы при определённой рабочей нагрузке.

По каждому потоку заявок могут вычисляться времена реакций и ожидания, количества обслуженных и потерянных заявок. По каждому устройству определяется время загрузки при обслуживании одной заявки и число обслуженным устройством заявок, время простоя устройства в результате отказов и количество отказов, возникших в процессе моделирования, длины очередей и занимаемые ёмкости памяти.

При статистическом моделировании большая часть характеристик - это случайные величины. По каждой такой характеристике у определяется N значений, по которым строится гистограмма относительных частот, вычисляется математическое ожидание, дисперсия и моменты более высокого порядка, определяются средние по времени и максимальные значения. Коэффициенты загрузки устройств вычисляются по формуле:

$$\rho_k = V_k \cdot N_{ok} / T_m.$$

V_k - среднее время обслуживания одной заявки k -ым устройством;

N_{ok} - количество обслуженных заявок устройством за время моделирования T_m .

Определение условий удовлетворения стохастических ограничений при имитационном моделировании производится путём простого подсчёта количества измерений, вышедших и не вышедших за допустимые пределы.

Рассмотрим машинную модель M_m , системы S как совокупность блоков $\{m_i\}$, $i=1,2,\dots,n$. Каждый блок модели можно охарактеризовать конечным набором возможных состояний $\{Z_0\}$, в которых он может находиться. Пусть в течение рассматриваемого интервала времени $(0, T)$ блок i изменяет состояние в моменты времени $t_{ij} \leq T$, где j - номер момента времени. Момент времени можно разделить на три группы:

- случайные, связанные с внутренними свойствами блока;
- случайные, связанные с изменением состоянием других блоков, имитирующая воздействие среды E ;
- детерминированные моменты, связанные с заданным расписанием функционирования блока.

Моментами смены состояний модели M_m в целом $t(k) \leq T$ будем считать все моменты изменения блоков $\{m_i\}$, рис. 8.1. см. ниже.

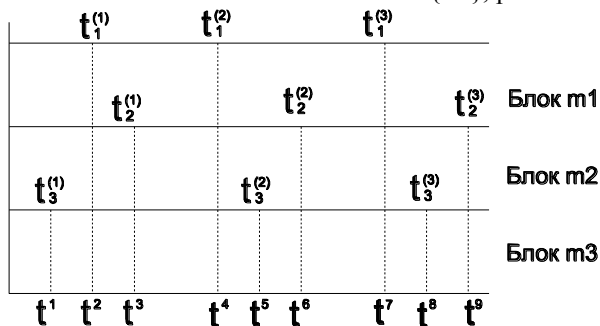


Рис. 3.1 - Смена состояний модели для случаев 3-х блоков

При этом моменты $t_i(j)$ и t_k являются моментами системного времени, т.е. времени, в котором функционирует система S . При машинной реализации модели M_m её блки представляются соответствующими программными модулями.

При моделировании Q -схем следует адекватно учитывать как связи, отражающие движения заявок (сплошные линии) так и управляющие связи (пунктирные линии).

Рассмотрим фрагмент Q -схемы (рис. 3.2.):

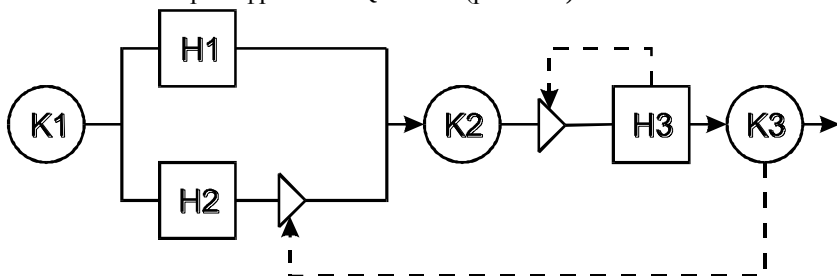


Рис. 3.2 - Фрагмент Q -схемы

Примерами управляющих связей являются различные блокировки обслуживающих каналов (по входу и по выходу): «клапаны» изображены в виде треугольников, а управляющие связи пунктирными линиями. Блокировка канала по входу означает, что этот канал отключается от входящего потока заявок, а блокировка канала

по выходу указывает, что заявка обслуженная блокированным каналом, остаётся в этом канале до момента снятия блокировки. В этом случае, если перед накопителем нет «клапана», то при его переполнении будут иметь место потери заявок.

Моделирующий алгоритм должен отвечать следующим требованиям [10]:

- обладать универсальностью относительно структуры, алгоритмов функционирования и параметров системы S;
- обеспечивать одновременную и независимую работу системы S;
- укладываться в приемлемые затраты ресурсов ЭВМ. (памяти, времени расчёта для реализации машинного эксперимента);
- проводить разбиение на достаточно автономные логические части (блоки);
- гарантировать выполнение рекуррентного правила расчётов;

При этом необходимо иметь виду, что появление одной заявки входящего потока в некоторый момент времени t_i может вызвать изменение состояния не более чем одного из элементов Q-схемы, а окончание обслуживания заявки в момент t_i в некотором канале K может привести в этот момент времени к последовательному изменению состояний нескольких элементов (H,K), т.е. будет иметь место процесс распространения смены состояний в направлении противоположном движению заявки в системе S. Поэтому просмотр элементов Q-схемы должен быть противоположным движению заявок.

Все виды моделирующих алгоритмов Q-схемы можно классифицировать следующим образом (рис. 3.3):

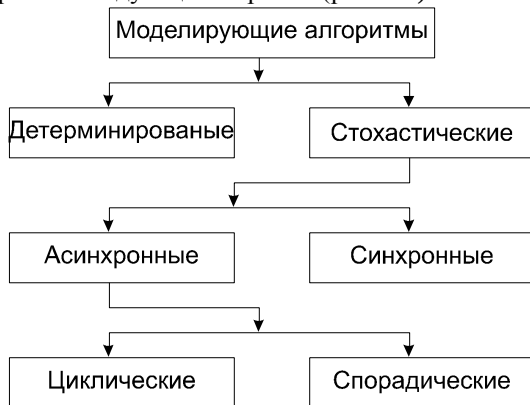


Рис.3.3 - Виды моделирующих алгоритмов Q-схемы

Алгоритмы моделирующие Q-схему по принципу « Δt » являются детерминированными (по шагу), а по принципу особых состояний – стохастические. Последние могут быть реализованы синхронным и асинхронным способами.

При синхронном способе один из элементов Q-схемы (И, Н или К) выбирается в качестве ведущего и по нему «синхронизируется» весь процесс моделирования.

При асинхронном способе - ведущий (синхронизирующий) элемент не используется, а очередному шагу моделирования (просмотру элементов Q-схемы) может соответствовать любое особое состояние всего множества элементов И, Н и К. При этом просмотр элементов Q-схемы организован так, что при каждом особом состоянии либо циклически просматриваются все элементы, спорадически - только те элементы, которые в этом случае могут изменить своё состояние. (просмотр с прогнозированием)

Прежде чем использовать какой либо язык для моделирования Q-схемы, необходимо глубже вникнуть в суть процесса построения и реализации М.А.

Пример. Рассмотрим Q-схему (рис. 3.4.):

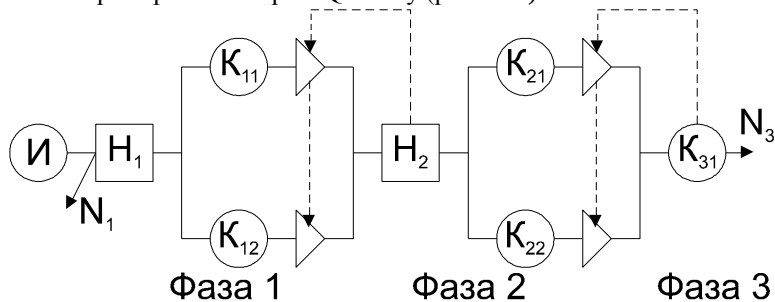


Рис. 3.4 - Трехфазная Q-схема

Примем обозначения:

P - вероятность потери заявки ($P=N1/(N1+N3)$);

t_m - время появления очередной заявки из источника;

$t_{k,j}$ - время окончания обслуживания заявки каналом $K_{k,j}$,
 $k=1,2,3...; j=1,2...;$

$z_i, z_{k,j}$ - состояния накопителей и каналов обслуживания;

t_n - текущее время моделирования;

L_i - ёмкость i -ого накопителя;

L_{km} - число каналов в k -ой фазе;

N_1, N_2 - число выходных заявок;

T - интервал моделирования;

При имитации Q-схемы на ЭВМ требуется организовать массив состояний:

$z_{k,j}$, $t_{k,j}$, $j=1, L_{km}$; z_i - число заявок в накопителе H_i ; $i=1,2$; t_i - i -ая заявка из источника.

$z_{k,j} = \{1\text{- канал занят; } 0\text{- канал свободен; } 2\text{- заблокирован}\}$;

Укрупнённая схема детерминированного МА Q-схемы, построенного по «принципу Δt » представлена на рис. 3.5.

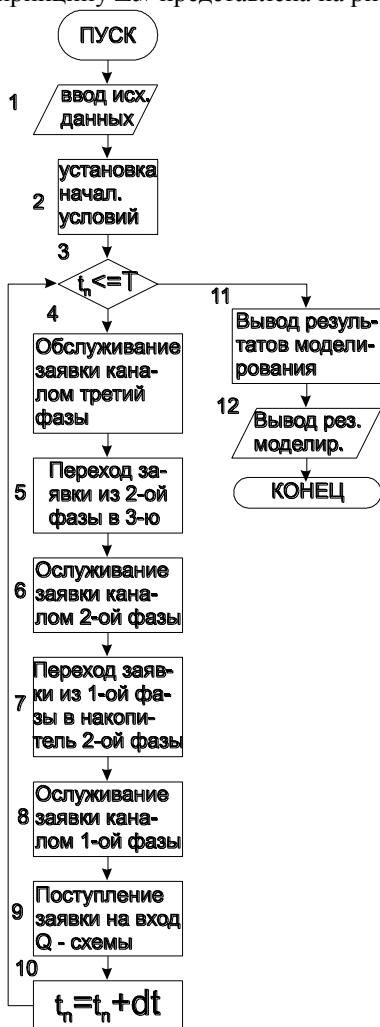
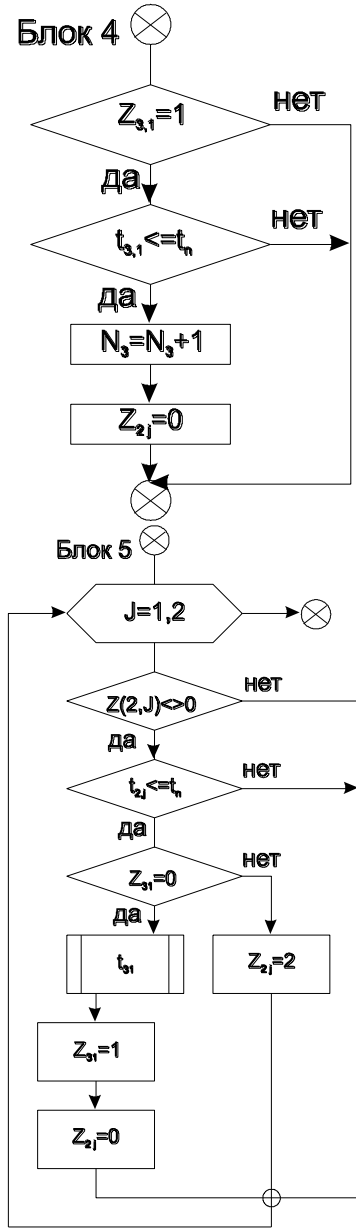
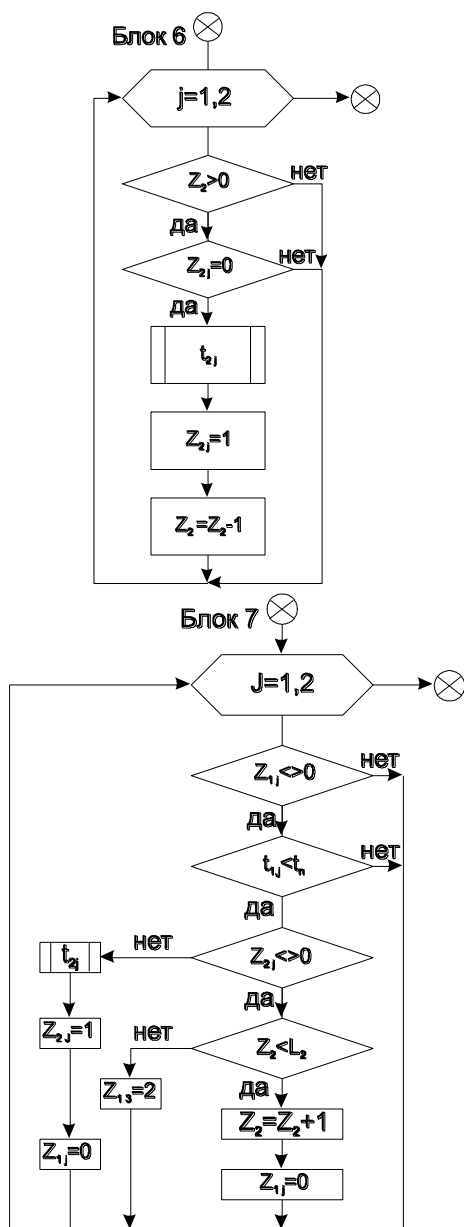


Рис. 3.5 - Блок схема моделирования Q-схемы по принципу « Δt »

А далее более подробно рассмотрены алгоритмы блоков 4-9.





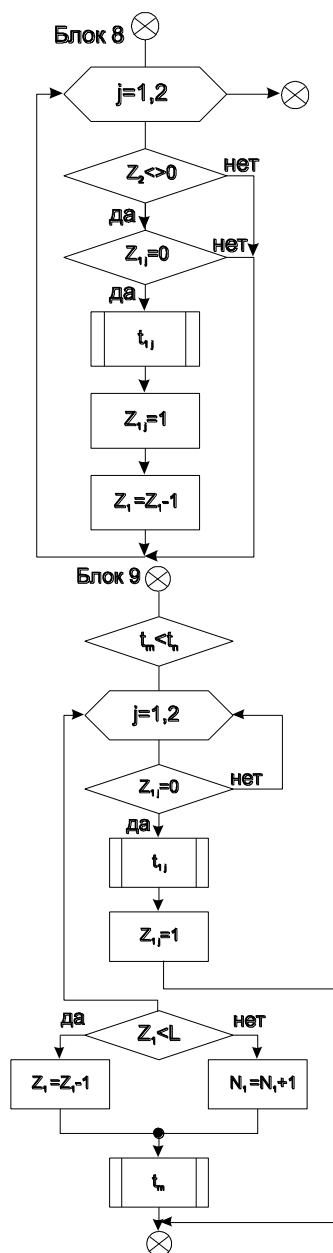


Рис. 3.5 - Блок схема моделирования Q-схемы по принципу «Δt»

3.2 Обобщенные модели А-схемы

Обобщенный подход базируется на понятии агрегативной системы (от англ. aggregate system), представляющей собой формальную схему общего вида, которую будем называть А-схемой. Этот подход позволяет описывать поведение непрерывных и дискретных, детерминированных и стохастических систем

Комплексное решение проблем, возникающих в процессе создания и машинной реализации модели, возможно лишь в случае, если моделирующие системы имеют в своей основе единую формальную математическую схему, т. е. А-схему. А-схема должна выполнять несколько функций [11]:

- являться адекватным математическим описанием объекта моделирования;
- позволять в упрощенном варианте (для частных случаев) проводить аналитические исследования.

Представленные требования несколько противоречивы, но в рамках обобщенного подхода на основе А-схем удастся найти между ними компромисс.

При агрегативном подходе первоначально дается формальное определение объекта моделирования - агрегативной системы. При агрегативном описании сложный объект (система) разбивается на конечное число частей (подсистем), сохраняя при этом связи, обеспечивающие их взаимодействие. В случае сложной организации полученных подсистем, подсистемы декомпозируются до уровней в которых они могут быть удобно математически описаны. В результате сложная система представляется в виде многоуровневой конструкции из взаимосвязанных элементов, объединенных в подсистемы различных уровней.

Элементом А-схемы является агрегат. Связь между агрегатами (внутри системы S и с внешней средой E) осуществляется с помощью оператора сопряжения R . Агрегат может рассматриваться как А-схема, т. е. может разбиваться на элементы (агрегаты) следующего уровня.

Характеристиками агрегата являются множества моментов времени T , входных X и выходных Y сигналов, состояний Z в каждый момент времени t .

Пусть переход агрегата из состояния $z(t_1)$ в состояние $z(t_2) \neq z(t_1)$ происходит за малый интервал времени Δt . Переходы из состояния $z(t_1)$ в $z(t_2)$ определяются внутренними параметрами агрегата $h(t) \in H$ входными сигналами $x(t) \in X$.

В начальный момент времени t_0 состояния z имеют значения, равные z^0 , т. е. $z^0 = z(t_0)$, которые задаются законом распределения $L[z(t_0)]$. Пусть изменение состояния агрегата при входном сигнале x_n описывается случайным оператором V . Тогда для момента времени $t_n \in T$ при поступлении входного сигнала x_n состояние определяется (3.1).

$$z(t_n + 0) = V[t_n, z(t_n), x_n] \quad (3.1)$$

Если на интервале времени $(t_n, t_n + i)$ нет поступления сигналов, то для $t \in (t_n, t_{n+1})$ состояние агрегата определяется случайным оператором U , можно записать (3.2)

$$z(t) = U[t, t_n, z(t_n + 0)] \quad (3.2).$$

Так как на оператор U не накладываются никакие ограничения, то допустимы скачки состояний δz в моменты времени, не являющимися моментами поступления входных сигналов x .

Моменты скачков δz называются особыми моментами времени t_s , состояния $z(t_s)$ - особыми состояниями А-схемы. Для описания скачков состояний δz в особые моменты времени t_s используется случайный оператор W , который представляет собой частный случай оператора U (3.3).

$$z(t_s + 0) = W[t_s, z(t_s)] \quad (3.3).$$

На множестве состояний Z выделяется такое подмножество $Z^{(Y)}$, что если $z(t_s)$ достигает $Z^{(Y)}$, то это состояние является моментом выдачи выходного сигнала. Выходной сигнал можно описать оператором выходов (3.4)

$$y = G[t_s, z(t_s)] \quad (3.4).$$

Агрегатом будем понимать любой объект, который описывается следующим образом (3.5).

$$A_n = \langle T, X, Y, Z, Z^{(Y)}, H, V, U, W, G \rangle \quad (3.5).$$

Вопросы для самопроверки по разделу 3:

1. В чем заключается метод имитационного моделирования?
2. Поясните моделирующий алгоритм, который реализует принцип постоянного приращения модельного времени.
3. Перечислите измеряемые характеристики моделируемых систем.
4. Охарактеризуйте методы определения характеристик моделируемых систем.

4 Моделирование случайных воздействий

4.1 Моделирование случайных воздействий

В моделировании систем методами имитационного моделирования, существенное внимание уделяется учету случайных факторов и воздействий на систему. Для их формализации используются случайные события, дискретные и непрерывные величины, векторы, процессы. Формирование реализации случайных объектов любой природы сводится к генерации и преобразованию последовательностей случайных чисел.

В практике имитационного моделирования систем на ЭВМ ключевым фактором является оптимизация алгоритмов работы со случайными числами.

Таким образом, наличие эффективных методов, алгоритмов и программ формирования, необходимых для моделирования конкретных систем последовательностей случайных чисел, во многом определяет возможности практического использования машинной имитации для исследования и проектирования систем.

4.2 Особенности моделирования случайных событий

Важной задачей в практике имитационного моделирования систем на ЭВМ является расчёт случайных величин. В языках программирования существуют датчики равномерно распределённых псевдослучайных величин в интервале $\{0,1\}$. Остановимся на вопросах преобразования последовательности псевдослучайных величин $\{X_i\}$ в последовательности $\{Y_i\}$ с заданным законом распределения и моделировании различных случайных событий.

Пусть имеются случайные числа x_i , т.е. возможные значения случайной величины ξ , равномерно распределённой в интервале $\{0,1\}$. Необходимо реализовать случайное событие A , наступающее с заданной вероятностью P . Определим A как событие, состоящее в том, что выбранное значение x_i удовлетворяет неравенству: $x_i \leq P$.

Тогда вероятность события A будет:

$$P(A) = \int_0^P dx = P.$$

Противоположное событию A состоит в том, что $x_i > P$. Тогда $P(\bar{A}) = 1 - P$. Процедура моделирования состоит в этом случае в выборе значений x_i и сравнение их с P . При этом, если условие (1) удовлетворится, то исходом испытания будет событие A .

Таким же образом можно рассмотреть группу событий. Пусть $A_1, A_2, \dots, A_n$ – полная группа событий, наступающая с вероятностями $P_1, P_2, \dots, P_n$ соответственно. Определим A_m как событие, состоящее, в том, что выбранное значение x_i случайной величины ξ удовлетворяет неравенству:

$$l_{m-1} < x_i < l_m,$$

где
$$l_k = \sum_{i=1}^k P_i.$$

Тогда

$$P(A_m) = \int_{l_{m-1}}^{l_m} dx = P_m.$$

Процедура моделирования испытаний в этом случае состоит в последовательности сравнений случайных чисел x_i со значениями l_k .

При моделировании систем часто необходимо осуществить такие испытания, при которых искомый результат является сложным событием, зависящим от 2-х и более простых.

Вопросы для самопроверки по разделу 4:

1. Поясните принцип вычисления непрерывных случайных величин.
2. Поясните принципы преобразования случайных величин.
3. Охарактеризуйте метод исключений, применяемый для моделирования непрерывных случайных величин.
4. Каким образом осуществляется моделирование нормально распределённой случайной величины?

5 Моделирование систем с использованием типовых математических схем и автоматизированных программ

5.1 Имитационное моделирование систем массового обслуживания

Одним из методов исследования сложных систем, в том числе, и систем массового обслуживания (СМО) является метод имитационного моделирования, когда модель (как следует из названия вида моделирования) имитирует работу реальной системы, т.е. модель воспроизводит процесс функционирования реальной системы во времени.

Любая система, как известно, представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов и, следовательно, построение ее адекватной имитационной модели предполагает имитацию процесса функционирования каждого отдельного элемента системы с обязательным сохранением логики и правил взаимодействия и развития составляющих систему элементов, как во времени, так и в пространстве (в том числе последовательность и параллелизм их во времени).

Основное преимущество имитационного моделирования перед другими видами моделирования (например, аналитическим) состоит в универсальности в смысле возможности исследования любых достаточно сложных систем, с учетом таких факторов и условий, которые трудно или вообще невозможно учитывать при аналитическом моделировании. Поэтому во многих случаях имитационное моделирование становится наиболее эффективным, а часто и практически единственно доступным методом исследования систем. Например, результативный анализ СМО типа G/G/N аналитическими методами невозможен, в то время как такой анализ методами имитационного моделирования не представляет особой сложности.

При исследовании систем со стохастическим характером функционирования (СМО являются системами такого типа) результаты, полученные при единичном "прогоне" имитационной модели (при единичном воспроизведении на имитационной модели процесса функционирования системы), носят частный характер. Следовательно, для того, чтобы найти одну оценку (одно значение) какой-либо характеристики функционирования системы необходимо многократно "прогонять" имитационную модель (необходимо получить множество результатов) с последующей статистической обработкой полученных данных. Поэтому в имитационной модели

должны быть предусмотрены средства сбора и средства последующей статистической обработки данных, полученных в ходе моделирования по интересующим характеристикам системы. Например, моделирование случайной величины Y , распределенной по экспоненциальному закону $F(y) = 1 - e^{-\lambda t}$ с параметром λ , предполагает выполнение следующих действий:

1) розыгрыш равномерно распределенного случайного числа $x \in [0, \omega]$;

2) определение соответствующего значения $y = F^{-1}(x) = -\ln x / \lambda$.

Единичная реализация этой элементарной имитационной модели из двух действий дает одно значение случайной величины Y . Если задача (цель) моделирования состоит в оценке среднего значения $\bar{Y}$, то необходимо добавить в модель дополнительное (третье) действие $S = S + y$ для накопления суммы случайных величин (средство сбора) и многократно реализовать полученную модель. В конце моделирования в качестве оценки для $\bar{Y}$ принять отношение S/N (средство обработки), где N – общее число реализаций модели.

Если необходимо построить (найти) функциональную зависимость среднего значения $\bar{Y}$, например, от параметра λ , то для множества точек этой зависимости нужно проделать каждый раз всю описанную выше процедуру моделирования, сбора и обработки данных. Даже в такой простой задаче очевидным образом проявляется присущий имитационному моделированию недостаток — это его трудоемкость.

5.2 Действия и события в системах

Процесс функционирования системы - это последовательная смена состояний системы во времени или другими словами, процесс функционирования системы - это переход ее из одного состояния в другое. Причина перехода системы из состояния в состояние называется событием, которое является, в свою очередь, следствием начала или окончания соответствующего действия.

Рассмотрим действия и события, имеющие место в системах на примере СМО типа G/G/1, где под состоянием системы понимается число заявок k , находящихся в ней в данный момент времени. Хронологическая последовательность действий и событий, имеющих место в общем случае в такой СМО при прохождении через систему одной заявки (одного элемента).

Различают два вида событий:

- 1) основные (особые) события;
- 2) вспомогательные (второстепенные) события. Основным событием называется событие, наступление которого приводит к изменению состояния системы.

Именно основное событие имелось в виду при определении события как причины перехода системы из одного состояния в другое. Очень часто при имитационном моделировании дается другое определение основного события как события, время наступления которого можно планировать (предсказать) заранее, т.е. рассчитать его можно до фактического возникновения события.

Любое событие, не являющееся основным, называется вспомогательным (второстепенным). Вспомогательные события являются следствием возникновения основных событий и, следовательно, зависимы от них и наступают тогда же, когда и основные.

Для рассматриваемой нами системы G/G/1 такими параметрами являются интервалы поступления и длительности обслуживания заявок. Очевидно, что по истечении интервала поступления и длительности обслуживания наступают соответственно события «прибытие заявки» и «окончание обслуживания». Именно эти два события и являются основными в рассматриваемой системе, и появление их вызывает очевидные переходы системы из состояния в состояние. Все другие события являются вспомогательными. Так, события «начало обслуживания» и «занятие прибора» являются следствием наступления либо события «приход заявки» (если система свободна), либо события «окончание обслуживания» (для предыдущей заявки). В свою очередь, события «освобождение прибора» и «уход из системы» являются следствием возникновения события «окончание обслуживания».

Ни одно вспомогательное событие, очевидно, не приводит к изменению состояния системы. Таким образом, процесс функционирования системы, будучи процессом перехода из состояния в состояние, можно представить как упорядоченную во времени последовательность основных событий, происходящих в системе и переводящих ее из одного состояния в другое. Для поддержания этой хронологической последовательности основных событий в модели используется время.

5.3 Модельное время

Имитационное моделирование, как правило, проводится с использованием средств вычислительной техники в соответствии с программой, реализующей последовательность возникающих в системе основных событий, т.е. соответствующий процесс функционирования системы. При этом несколько часов, суток, лет работы реальной системы моделируется за несколько секунд, минут, часов работы компьютера.

При имитационном моделировании различают три вида времени.

1. Время реальной системы - это время, в котором «живет», функционирует моделируемая система.

2. Модельное время - это «искусственное» время, в котором «живет» модель или другими словами это время, которое является имитацией, прообразом (моделью) времени реальной системы.

3. Реальное время - это время, в котором живет исследователь, компьютер или другими словами это время необходимое для моделирования (затратное время).

Для нас наибольший интерес представляет модельное время. Для того, чтобы вести отсчет модельного времени и обеспечить правильную хронологическую последовательность наступления основных событий в имитационной модели используется так называемый таймер модельного времени, которая представляет собой переменную для хранения (фиксации) текущего значения модельного времени.

В процессе моделирования системы, таймер модельного времени, безусловно, должен постоянно корректироваться в соответствии с теми основными событиями, которые возникают в реальной системе. При этом существуют два способа (два принципа) коррекции значения таймера модельного времени:

1) коррекция с постоянным шагом (принцип Δt);

2) коррекция с переменным шагом (принцип δz).

В первом случае при каждой коррекции модельное время увеличивается на одно и то же значение Δt , выбираемое перед началом моделирования, а во втором случае значение приращения таймера каждый раз является случайной, а, значит, переменной величиной.

5.4 Логическая схема имитационной модели

Используя изложенные выше положения, разработаем обобщенную логическую схему имитационной модели простейшей СМО типа G/G/1, которую затем, зная стандартные процедурные

языки программирования, можно реализовать на компьютере. Разработку схемы будем вести при следующих условиях.

Заданы функции распределения $A(t)$ и $B(t)$ для интервалов поступления и длительностей обслуживания заявок, т.е. СМО полностью формализована.

В системе соблюдается условие существования стационарного режима, т.е. условие, что загрузка $\rho = b/a < 0$, где a и b – средние значения соответственно интервалов поступления и длительностей обслуживания.

В начале моделирования система свободна.

Задано время моделирования T и в общем случае, когда моделирование завершается, система может быть не свободна.

Дисциплиной обслуживания является дисциплина FIFO.

В результате моделирования определяются следующие характеристики функционирования СМО:

- а) загрузка системы ρ ;
- б) среднее время ожидания ω ;
- в) средняя длина очереди l ;
- г) среднее время пребывания u ;
- д) среднее число заявок в системе m ;
- е) максимальная длина очереди $N_{q\max}$.

5.5 Планирование основных событий

Для рассматриваемой системы G/G/1, как отмечалось ранее, основными событиями являются события «прибытие заявки» и «окончание обслуживания», которые «связаны» соответственно с интервалом поступления и длительностью обслуживания заявки. Ранее также отмечалось, что основные события можно планировать заранее. Что означает это утверждение?

Суть этого утверждения состоит в том, что:

а) зная функцию распределения $A(t)$ интервалов поступления, при имитационном моделировании в момент прихода очередной заявки можно определить момент поступления следующей заявки;

б) аналогично, зная функцию распределения $B(t)$ длительностей обслуживания, при имитационном моделировании в момент начала обслуживания заявки можно определить момент его окончания.

Необходимо планировать приход следующей заявки. Для этого сначала нужно разыграть (первый этап) случайную величину в соответствии с функцией распределения $A(t)$ интервалов поступления, используя метод обратной функции.

Время прибытия следующей заявки, таким образом, определено, причем определено точно. Получается, что модель каждый раз в момент прихода очередной заявки узнает, когда появится следующая заявка, хотя в реальной системе момент появления следующей заявки, безусловно, неизвестен. Это необходимое допущение, принимаемое в имитационном моделировании, при длительном моделировании в статистическом смысле не влияет на адекватность модели реальной системе.

5.6 Обзор средств моделирования для сенсорных сетей

Сенсорные сети могут насчитывать от сотни до тысячи узлов, которые собирают информацию, обрабатывают ее и при необходимости отсылают устройству сбора данных и принятия решений.

В настоящий момент стоимость компонентов сенсорной сети достаточно велика, для того чтобы построить сеть для научных исследований, поэтому наиболее эффективным средством для оценки показателей качества инфокоммуникационных систем является имитационное моделирование. Для этой цели в настоящее время разработано большое количество сетевых симуляторов. Рассмотрим наиболее распространённые из них.

5.7 Симулятор NS - 2

NS - 2 – это сетевой симулятор дискретных событий предназначен для сенсорных сетей. NS_2 симулятор с открытым исходным кодом (Open Source software), он поддерживается и расширяется огромным количеством пользователей, доступен для пользования только под Linux, использует лицензию GNU GPLv2. Этот симулятор используется для научных исследований, ведь эта среда основана на открытом исходном коде. Имеется поддержка мобильных сенсорных сетей, стандартов 802.11 и 802.15.4. Ведь работа ведется с сенсорными сетями, а данный пакет включает в себя множество основных моделей энергопотребления и очень близок к тем, которые используются в реальных сенсорных узлах. Существует поддержка алгоритмов маршрутизации в сенсорных сетях. Также имеется поддержка стандартных беспроводных ad_hoc протоколов. На рис. 2.1 показан внешний вид диалогового окна.

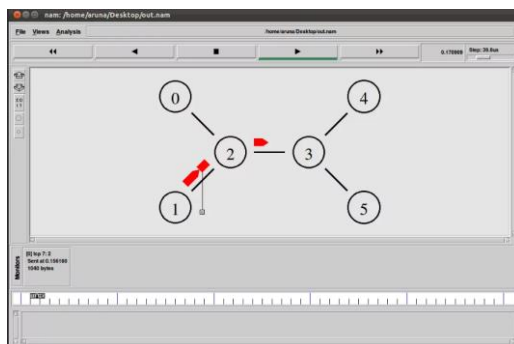


Рис. 5.1 – Внешний вид диалогового окна – NS - 2

Следует упомянуть, что в первых версиях модели были реализованы базовые функции сетевого уровня ZigBee, но позднее они были исключены из общего доступа, поскольку не в полной мере соответствовали данному стандарту. В связи с этим на текущий момент можно использовать только существующие в NS-2 протоколы маршрутизации, которые не до конца учитывают особенности беспроводных сенсорных сетей.

Документации по применению симулятора немного, мало обучающей литературы. Предлагается обращаться к списку часто задаваемых вопросов и анализировать исходный код модели [5].

5.8 Симулятор OPNET Modeler

OPNET Modeler (Optimized Network Engineering Tools) - мощная среда имитационного моделирования дискретных событий и состояний. Она включает множество библиотек сетевых технологий и протоколов связи, таких как TCP/IP, протокол передачи гипертекста (HTTP), технология асинхронного режима передачи (ATM) и FrameRelay, IP-QoS, 802.11 (Wi-Fi), ZigBee и др. Эти библиотеки поставляют блоки для построения моделей сетей. Одним из множества модулей, доступных в OPNET Modeler, является беспроводной модуль. Он расширяет функциональность среды для имитационного моделирования и анализа беспроводных сетей.

В версии OPNET Modeler 14.0 доступны модели узлов ZigBee, разработанные самой компанией OPNET. При этом исходный код модели сетевого уровня и уровня приложений скрыт от пользователей. Доступен только код модели нижнего уровня 802.15.4. Также существует модель узлов-сенсоров с открытым исходным кодом, соответствующая стандарту IEEE 802.15.4, разработкой, которой занимается сообщество OPEN-ZB.

Также существует модель узлов-сенсоров с открытым исходным кодом, соответствующая стандарту IEEE 802.15.4, разработкой, которой занимается сообщество OPEN-ZB. Разные версии данной модели работают с OPNET Modeler 10.5 представлены в табл. 5.1

Таблица 5.1

Существующие модели OPEN-ZB для OPNET

OPEN-ZB модель	Дата выпуска	Версия OPNET
OPNET Simulation Model v 3.0b	20.11.2009	15.0
OPNET Simulation Model v 2.1	31.03.2009	14.5
OPNET Simulation Model v 2.0	22.05.2007	11.5
OPNET Simulation Model v 1.0	06.04.2006	10.5

Модель OPEN – ZB реализует физический уровень и уровень доступа к среде, и соответствует стандарту IEEE 802.15.4. Версия модели 2.1 доступна только топологию звезда, где коммуникации происходят между конечными устройствами через центральное устройство, называемое координатором частной сети. В модели версии 2.1 существует два типа узлов:

- `wpan_analyzer_node` – узел, который собирает глобальные для частной сети статистические данные;
- `wpan_sensor_node` – узел, который реализует протоколы связи стандарта IEEE 802.15.4-2003.

Структура узла-сенсора, использованная в модели, состоит из четырех функциональных блоков:

- физический уровень состоит из радиопередатчика (tx) и приёмника (rx), которые в соответствии со спецификацией IEEE 802.15.4 работают на частоте 2,4 ГГц со скоростью обмена данными 250 Кбит/сек. Мощность передатчика установлена в 1мВт с модуляцией QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Физический уровень реализован при помощи уже существующего в OPNET Modeler беспроводного модуля с указанием параметров, соответствующих стандарту IEEE 802.15.4.

- уровень доступа к среде реализует алгоритм CSMA/CA с фиксированными временными слотами ожидания передачи (slotted CSMA/CA) и механизм гарантированных временных слотов (GTS). GTS трафик (т.е. трафик чувствительный к скорости доставки)

приходящий от уровня приложения сохраняется в буфере определенной ёмкости и передается в сеть, когда соответствующий временной слот активен. Нечувствительные к времени доставки кадры данных сохраняются в неограниченном буфере и передаются в сеть в течение периода активной конкуренции, в соответствии с алгоритмом CSMA/CA с фиксированными временными слотами ожидания передачи. Данный уровень также может генерировать кадры маркеры для синхронизации устройств в сети, если узел работает в режиме координатора.

Структура компонентов узла-сенсора, использованная в модели OPEN – ZB 2.1 представлена на рис. 5.2.



Рис. 5.2 – Структура компонентов модели OPEN – ZB 2.1

Модель достаточно хорошо документирована, продолжает дорабатываться и поддерживаться. Более подробная характеристика модели приведена в техническом описании.

5.9 Симулятор TOSSIM (TinyOS Simulator)

TinyOS - система, специально разработанная для сенсорных сетей. Она имеет компонентную программную модель, описанную на языке nesC. TinyOS не является операционной системой в традиционном понимании. Это программная среда для встроенных систем и набор компонентов, которые позволяют создавать имитационные модели конкретным приложением, например, таким как TOSSIM.

Как и в большинстве других ОС, в TinyOS основным управляющим механизмом является событие. Событие сигнализирует о получении показаний сенсора, о поступлении пакета данных по

беспроводной связи, о срабатывании таймера или о завершении вычислений. Обработка аппаратного события лежит в основе всех операций в TinyOS. Именно поэтому, для моделирования работы узлов БСС необходимо уметь имитировать происходящие на них аппаратные события. Из этого следует, что основная задача TOSSIM — эмуляция событий для БСС, моты которой работают под управлением TinyOS

Симулятор TOSSIM может моделировать сети размерностью до нескольких тысяч узлов, и анализируя их, предсказывать поведение сети с высокой точностью. Моделируя сети с возможными помехами и ошибками, симулятор создает простую, но вместе с тем эффективную модель всевозможных взаимодействий узлов в сети. Описывая маломощную модель устройств TinyOS, симулятор моделирует поведение сенсорного узла с большой достоверностью, описывая его характеристики и проводя большое количество экспериментов. Для удобства разработчиков, TOSSIM поддерживает графический интерфейс пользователя, обеспечивая детальную визуализацию и воспроизведение действий запущенной имитационной модели.

Приведем общие характеристики эмулятора TOSSIM:

- масштабируемость — эмулятор может моделировать работу как отдельных мотов, так и огромных сетей, состоящих из нескольких тысяч узлов;

- полнота — эмулятор в состоянии моделировать различные схемы взаимодействия элементов БСС, причем не только алгоритмы и сетевые протоколы, но и изменяющуюся структуру сенсорной сети;

- точность — эмулятор может представлять поведение сети с необходимой точностью. Определение точного времени наступления событий важно, как для анализа, так и для тестирования приложений для БСС;

- достоверность — эмулятор реализует адекватный переход от моделируемой к реальной среде выполнения приложения, предоставляя разработчику возможность тестировать код, который предназначен для реального оборудования.

В состав эмулятора TOSSIM входят следующие элементы (рис. 2.3):

- очередь событий;
- набор программных компонентов, которые заменяют соответствующие аппаратные компоненты реальных мотов;
- механизмы описания моделей радиоканалов и аналого-цифровых преобразователей (ADC);
- средства связи, предоставляющие возможность внешним программам взаимодействовать с эмулятором.

На рис. 5.3 представлена архитектура эмулятора TOSSIM.

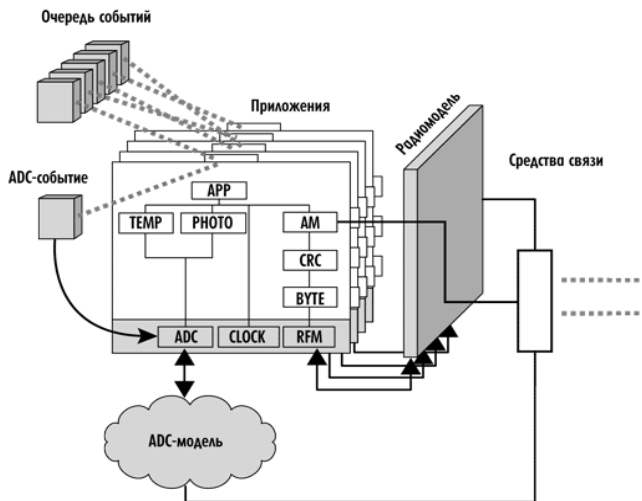


Рис. 5.3 - Архитектура эмулятора TOSSIM

Недостатками системы является невозможность симуляции гетерогенных сетей (любая коммерческая БСС – гетерогенная). Так же, не учитывается расход заряда источника питания.

5.10 Симулятор OMNeT++

OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) - среда имитационного моделирования дискретных событий и состояний с открытым исходным кодом, основанная на компонентах, которая становится всё более популярной. Основная область применения - моделирование сетей передачи данных, ИТ систем и бизнес процессов. Компоненты OMNeT++ написаны на C++.

Симулятор имеет графические инструменты для создания моделей и оценки результатов в режиме реального времени. Модели программы собираются из компонентов множественного использования, называемых модулями. Модули можно использовать много раз и объединять по принципу блоков LEGO.

На базе рассматриваемой среды моделирования существует библиотека MiXiM, которая позволяет создавать модели беспроводных сенсорных сетей.

Внутренняя структура узла представлена на рис. 2.4. Сплошные стрелки обозначают прохождение сообщений между модулями, а пунктирные - интерфейс между ними с вызовом простых функций.

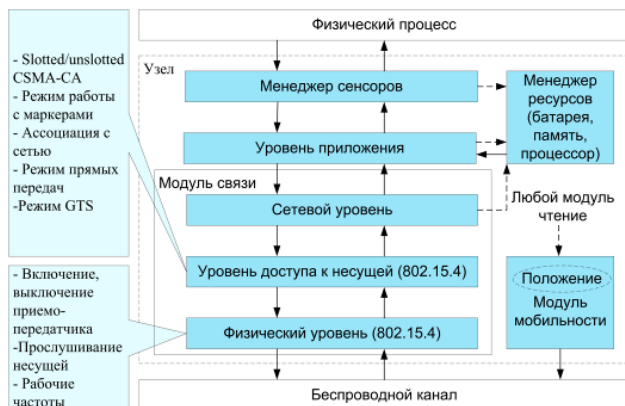


Рис. 5.4 - Внутренняя структура узла

Модель узла представлена следующими модулями:

1. Модуль управления сенсорами - позволяет генерировать более реальный трафик в БСС, нежели просто использование генераторов пакетов данных, предлагаемых другими моделями.

2. Модуль приложения чаще всего используется пользователями симулятора для реализации тестируемых алгоритмов. В симуляторе уже существует несколько простейших модулей приложения. Например, приложение оценки пропускной способности сети.

3. Модуль связи - состоит из трёх уровней:

- сетевой уровень - позволяет реализовать различные алгоритмы маршрутизации в беспроводной сенсорной сети. На текущий момент есть готовые простейшие алгоритмы маршрутизации (например, маршрутизация по дереву).

- уровень управления доступом к среде, в том числе IEEE 802.15.4. В версии 3.1 реализована основная часть задач уровня, описанная в стандарте IEEE 802.15.4-2006.

- физический уровень.

4. Модуль мобильности - хранит положение остальных узлов в сети и предоставляет данные о положении узла модели радиоканала.

5. Модуль управления ресурсами управляет различными ресурсами узла и наиболее важным из них - потребляемой энергией.

6. Модель радиоканала учитывает средние потери при распространении, изменения сигнала во времени, интерференцию. Также есть возможность использовать модель идеального радиоканала.

Модули соединяются между собой с помощью портов, и объединяются в составные модули с использованием высокоуровневого языка программирования NED. Количество вводимых модулей неограничено.

Модули связываются посредством передачи сообщений, которые содержат произвольные структуры данных. Модули могут передавать

сообщения по определенным портам и соединениям серверу или непосредственно друг другу. Последнее, к примеру, полезно для моделирования беспроводных сетей. На рис. 2.5 представлен графический редактор NED.

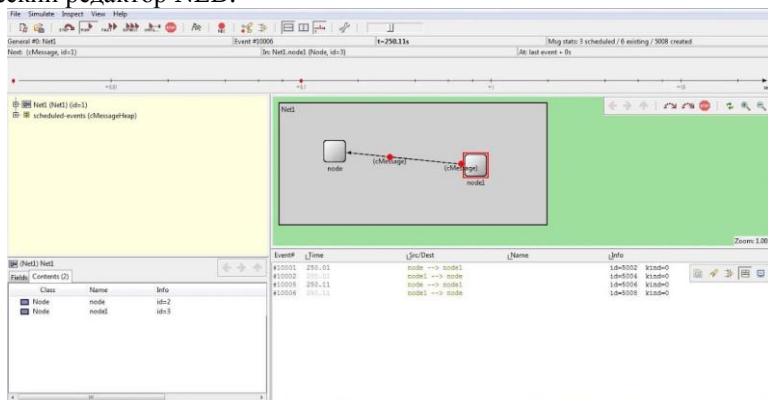


Рис. 5.5 – Графический NED редактор

Процесс моделирования может работать в различных пользовательских интерфейсах. Графически анимированный пользовательский интерфейс удобен для демонстрации и отладки сети, а интерфейс командной строки удобен для внесения изменений.

Компоненты OMNeT++:

- 1) корневая библиотека моделирования;
- 2) OMNeT ++ IDE на базе платформы Eclipse;
- 3) графический интерфейс выполняемого моделирования, ссылки на исполняемый файл (Tkenv);
- 4) пользовательский интерфейс командной строки для выполнения моделирования (Cmdenv);
- 5) документация, примеры.

OMNeT++ работает на базе самых распространенных операционных систем: (Linux, Mac OS/X, Windows).

5.11 Выбор средства моделирования

В данном разделе проводится набор критериев для оценки сравнительный анализ использования программных продуктов, представленных выше для создания имитационной модели беспроводной сенсорной сети (БСС) и проверки ее параметров.

В табл 5.2 приведены общие сравнительные характеристики возможностей симуляторов.

Таблица 5.2

Сравнительная характеристика возможностей

Параметр	NS-2	OMNeT++	OPNET Modeler (Open-ZB)
Расчет потребляемой мощности	+	+	-
Мобильность узлов	-	+	-
Соответствие спецификации ZigBee	-	+	-
Доступность	+	+	-

Наиболее перспективными в плане дальнейшей поддержки и развития представляется модель Omnet++. Особое внимание необходимо обратить на то, что исходный код является открытым и, что особенно важно, в ней реализованы основные функции сетевого уровня ZigBee. Среда моделирования на основе, которой она построена, имеет также открытый исходный код и распространяется бесплатно для некоммерческого использования.

Модель же open-zb, к сожалению, построена на базе очень дорогого коммерческого продукта OPNET Modeler 10.5 и выше, бесплатного только для университетов США.

5.12 Программная реализация модели беспроводной связи

Сценарий моделирования сети содержит:

1. Роутер - выполняет передачу данных, маршрутизирует пакеты.
2. Координатор – формирует сеть, задает настройки при подключении прибора в сеть.
3. Узлы модулей - это и есть оконечные устройства, имеющие батарейное питание. Узлы представляют собой контроллеры или

датчики. Количество узлов в сети проектируется в зависимости от потребности конкретного приложения. На рис. 5.6 представлена визуализация сценария моделирования.

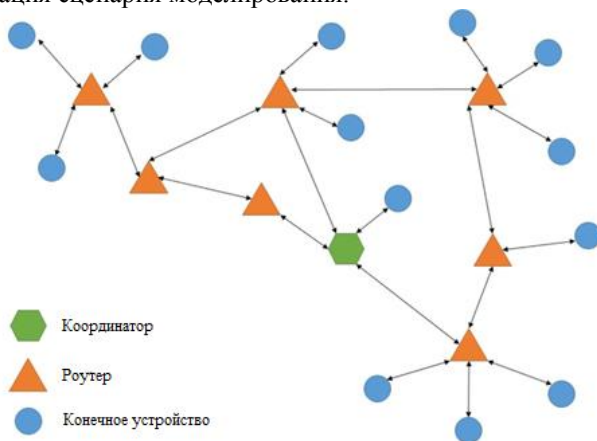


Рис. 5.6 – Визуализация сценария моделирования
Работа роутера и координатора заключается в организации соединений между хостами в сети.

5.13 Установка программного обеспечения

MiXiM - является фреймворком OMNeT++. MiXiM создан для моделирования, разработанная для мобильных и фиксированных беспроводных сетей (беспроводные сенсорные сети, нательные компьютерные сети, ad-hoc сетей, транспортных сетей и т. д.).

Для начала моделирования в среде OMNeT++ и MiXiM следует учесть следующие требования к операционной системе:

Поддерживаем платформы:

- Windows 7, 8 и XP; □
- Mac OS X 10.7, 10.8 и 10.9;
- Дистрибутивы Linux

OMNeT++ в свободном доступе можно скачать на сайте:
<http://omnetpp.org>.

MiXiM так же можно скачать по следующеe ссылке:
<http://mixim.sourceforge.net>.

Для запуска OMNeT++ необходимо скопировать архив *omnetpp-4.5-src.tgz* в нужную директорию и распаковать файлы. В папке найти и запустить файл *mingwenv.cmd*. Для установки OMNeT++ вводим команду:

```
$ ./configure
```

На рис. 5.7 показана установка OMNET++.

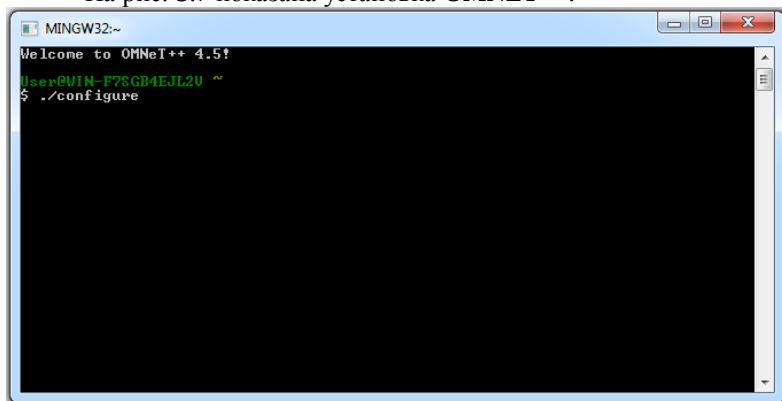


Рис. 5.7 – Установка OMNET++

Далее необходимо скомпилировать OMNET++.

Вводим команду \$ make. На рис. 5.8 показана компиляция установочного файла.

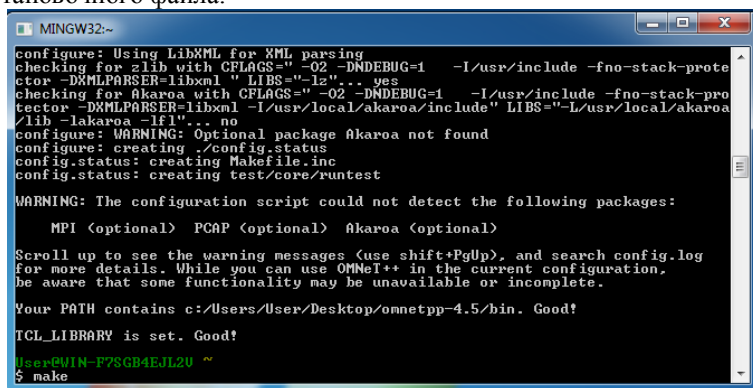


Рис. 5.8 – Компиляция установочных файлов

Для запуска OMNET++ вводим в терминале команду: \$ omnetpp. На рис. 5.9 показан запуск программы OMNET++.

- 6) base – базовые модули MiXiM;
 - 7) mapping – математическое отображение;
 - 8) protocols – классы для различных протоколов, реализованных в MiXiM;
 - 9) Power consumption – энергопотребление.
 - б) Classes: sensorApplLayer – тест класс прикладного уровня.
- Включает в себя следующие аргументы:
- 1) Packets: количество посылаемых пакетов в приложении;
 - 2) trafficType: интервал времени между генерации двух пакетов (значения – «периодичный», «экспоненциальный»);
 - 3) trafficParam: параметры для trafficType.
- На рис. 5.11 показана схема для sensorApplLayer.

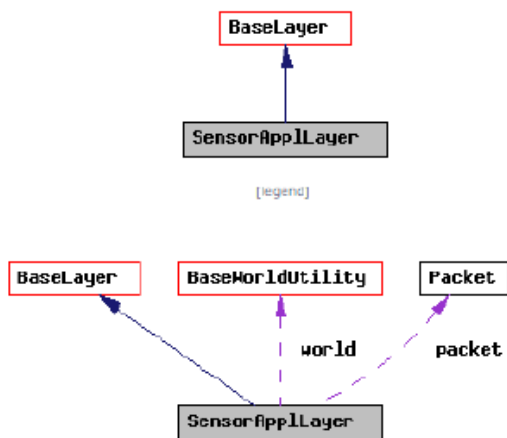


Рис. 5.11 – Схема для sensorApplLayer

в) mobility: MassMobilty – описание мобильной модели (мота), совершающей случайные передвижения.

Для установки MiXiM необходимо импортировать файлы в OMNeT++. В меню выбираем Files> Import> General> Existing projects into Workspace. Далее выбираем Next. В появившемся выбираем директорию с установочными файлами MiXiM. Обязательно ставим галочку в пункте copy project into workspace. Далее нажимаем Finish.

5.14 Описание разработанной модели

Для моделирования сети необходимо создать новый проект. В меню выбираем Files > New > New OMNeT++ Project:

Нажимаем next. В следующем окне выбираем папку с инструментами MiXiM. На рис. 5.12 показаны инструменты MiXiM.

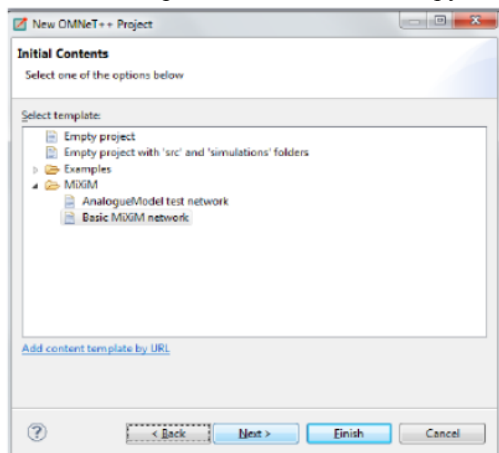


Рис. 5.12 – MiXiM инструменты

Выполняем настройки в соответствии с параметрами сенсорной сети. На рис. 5.13 представлена настройка модели сенсорной сети.

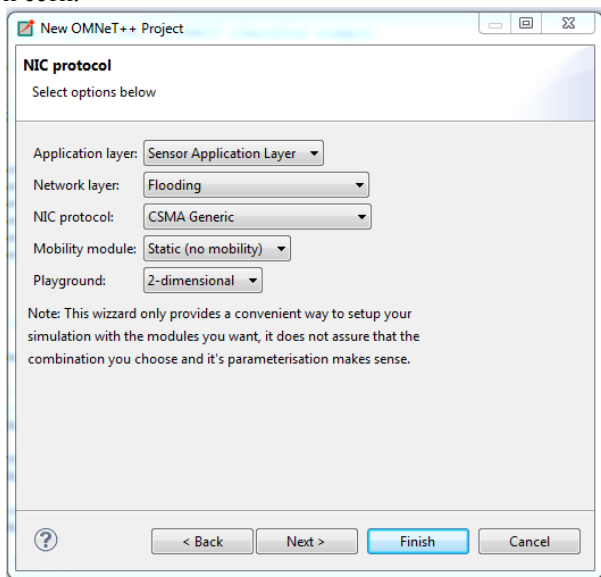


Рис. 5.13 – Настройки модели сенсорной сети

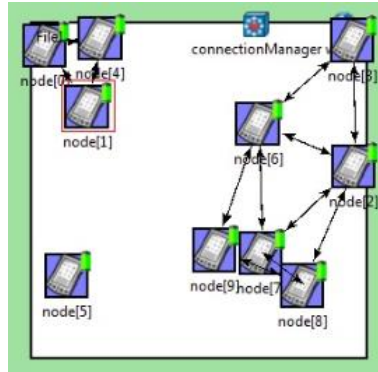


Рис. 5.15 - Топология сети в начальной точке (перед стартом моделирования)

В ходе выполнения моделирования топология периодически изменяется, что связано с движением объектов. Во всевозможные отрезки времени датчики меняют свое местоположение. На рис. 5.16 представлено расположение датчиков на 20-й минуте.

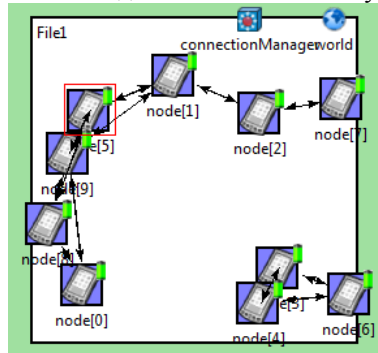


Рис. 5.16 – Расположение датчиков на 20-й минуте

Положение датчиков через 60 минут показано на рис. 5.17.

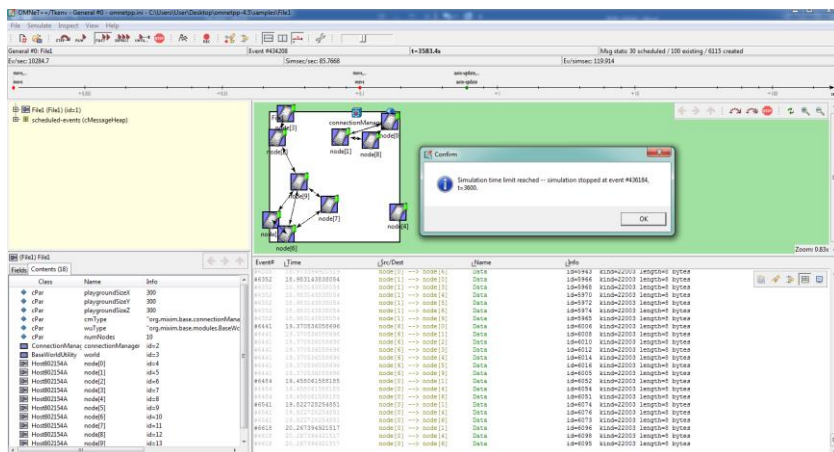


Рис. 5.17 – Положение датчиков через 60 минут

Таким образом, произведено моделирование мобильных датчиков. Были произведены настройки для датчиков сенсорной сети. Все устройства используют в качестве протокола канального уровня протокол IEEE 802.15.4. Моделирование проводилось для десяти датчиков в течение шестидесяти минут. Датчики меняют свое положение в разные моменты времени. Для создания беспроводной сенсорной сети использовались MiXiM инструменты.

Алгоритм работы данной модели основан на выборе определенного маршрута. При этом маршрут может содержать некоторое количество транзитных участков (хопов), включающих в себя узлы и соединяющие их каналы. Прохождение каждого из таких участков требует затрат времени, которые в совокупности определяют задержку доставки данных от отправителя к получателю.

Вопросы для самопроверки по разделу 3:

1. Приведите примеры управляющих связей.
2. Каким требованиям должен удовлетворять моделирующий алгоритм?
3. Приведите классификацию моделирующих алгоритмов.
4. Для чего нужны системы имитационного моделирования?
5. По каким критериям оцениваются библиотеки моделей?
6. Какие задачи решает подсистема анализа результатов моделирования системы?
7. В чем преимущества программы OmNet++?

5.15 Задание для практических занятий №1

Моделирование центра обслуживания вызовов как системы массового обслуживания

1. Установить программу MATLAB
2. Реализовать СМО вида (рис.).

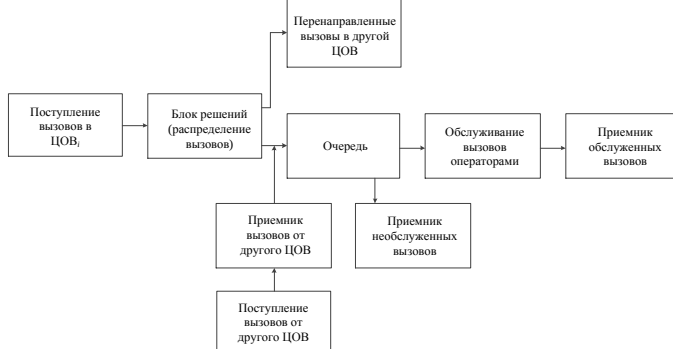


Рис. 5.18 – Моделирование системы массового обслуживания

Например, номер зачетки 060638, значит, берем 0,38 – вероятность обслуживания вызовов в собственном центре и 0,62 – вероятность перехода в другой центр. Четвертая цифра 6 четная – значит очередь FIFO, если будет нечетная – то очередь PR.

Моделирование должно быть запущено в то время, когда операторы свободны, и вызовы полностью отсутствуют. Заданными входными величинами разработанной модели будут являться следующие величины: заданные интенсивности поступления вызовов в систему λ_i и заранее заданные интенсивности обслуживания μ_i , также среднее время терпеливости пользователей $w = 180$ с., заданные вероятности поступления собственных вызовов в ЦОВ p_1 и перенаправленные от других локальных ЦОВ p_2 , число операторов в каждом из пяти центров $K_i = 4$ цифре и, естественно, время прекращения процесса моделирования T . Случайные события, происходящие в разработанной системе, должны моделироваться благодаря генератору случайных чисел.

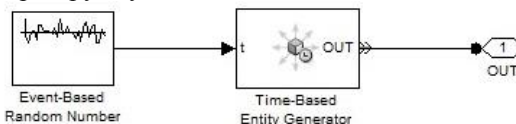


Рис. 5.19 - Блок-схема поступления собственных вызовов в отдельный ЦОВ

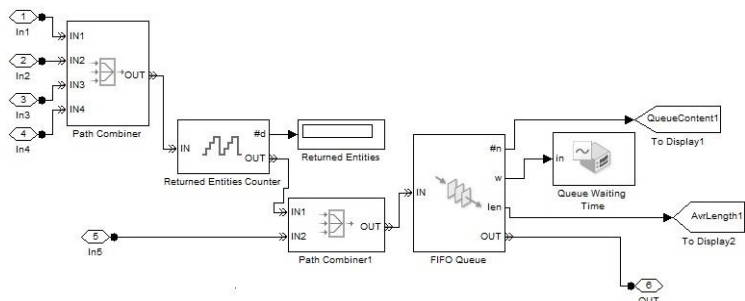


Рис. - Схема состояния заявок в очереди

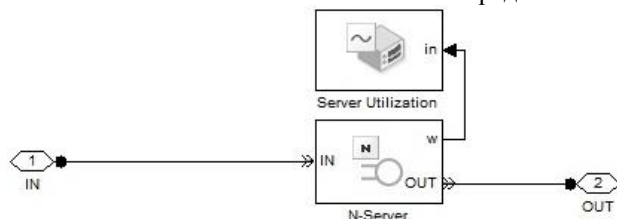


Рис. 5.20 - Схема реализации обслуживания вызовов

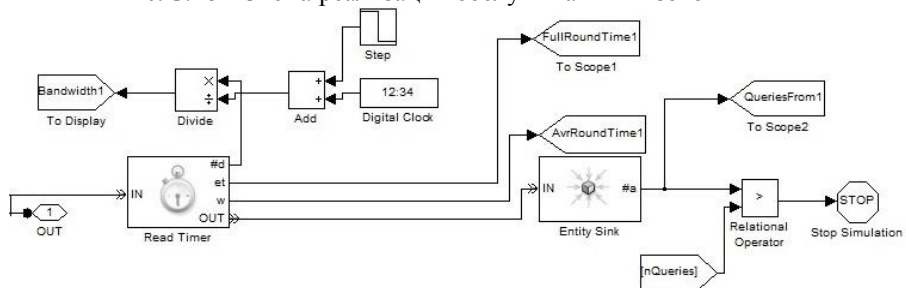


Рис. 5.21- Схема приемника заявок

После окончания моделирования можно получить следующие характеристики качества работы всей системы СМО:

1. Интенсивность поступления заявок в каждый ЦОВ λ_i ;
2. Интенсивность обслуживания поступивших в систему заявок μ_i ;
3. Временной интервал моделирования $[0, T]$;
4. Количество операторов в каждом центре K_i ;

5. Интенсивность отказов в обслуживании нетерпеливых клиентов θ_i ;

6. Вероятности передачи вызовов на очередь в собственном ЦОВ p_1 и перемаршрутизации вызовов в другой ЦОВ p_2 .

По окончании моделирования можно получить следующие данные, необходимые для расчета характеристик качества функционирования системы СМО:

1. Время, когда заявка прибыла в систему;
2. Время, когда заявка достигла очереди в каком-либо ЦОВ;
3. Время, когда вызов покинул очередь из-за нетерпеливости;
4. Время окончания обслуживания заявки;
5. Время, когда заявка покинула очередь;
6. Время, когда заявка полностью покинула РЦОВ;
7. Количество обслуженных вызовов собственных и перемаршрутизированных;
8. Загрузка каждого локального ЦОВ в составе РЦОВ;
9. Количество нетерпеливых пользователей.

Отчет должен содержать в себе:

1. Описание существующих систем СМО
2. Описание реализованной модели в программе
3. Описание входящих в модель блоков
4. Описание алгоритма функционирования БСС
5. Результаты математических расчетов, сравнение их с результатами имитационного моделирования, выявленный % погрешности разработанной модели
6. Выводы и заключение

Требования к оформлению отчета:

1. Отчет выполняется в печатном виде на листах формата А4.
2. Отчет должен содержать все необходимые компоненты (введение, пояснительная записка, заключение, список используемой литературы, список сокращений).
3. Все разрабатываемые схемы должны быть выполнены с использованием графического пакета MSVisio.

5.16 Задание для практических занятий №2

Моделирование беспроводных сенсорных сетей в программе

OmNet++

1. Установить программу OmNet++
2. Реализовать сеть по примеру (либо из мобильных, либо из стационарных датчиков) по варианту. Если две последние цифры зачетки ХУ, то задаем площадь работы датчиков $X*10$ на $Y*10$.

Например, номер зачетки 06038, значит берем 38, следовательно, площадь будет 30 на 80 м², количество датчиков (к примеру, мобильных) будет 80 штук.

3. Параметры для исследований:

- задержки при передаче,
- стандартное отклонение в узлах сети,
- передача пакетов в сети,
- помехозащищенность при передаче,
- энергопотребление в сети.

Отчет должен содержать в себе:

1. Описание беспроводных сенсорных сетей, их стандартов, областей использования.
2. Анализ имеющихся зарубежных исследований по БСС.
3. Анализ (достоинства и недостатки) имеющихся отечественных исследований по БСС.
4. Описание реализованной модели в программе.
5. Описание датчиков и выбранного беспроводного стандарта.
6. Описание алгоритма функционирования БСС.
7. Проведенный параметров, графики зависимости
8. Результаты математических расчетов, сравнение их с результатами имитационного моделирования, выявленный % погрешности разработанной модели.
9. Оценка приблизительной стоимости реализации таковой сети на практике.
10. Выводы о практической возможности реализации БСС (оценить основные преимущества и возможные трудности). Дать рекомендации по улучшению функционирования БСС.

Требования к оформлению отчета:

1. Отчет выполняется в печатном виде на листах формата А4.
2. Отчет должен содержать все необходимые компоненты (введение, пояснительная записка, заключение, список используемой литературы, список сокращений).
3. Все разрабатываемые схемы должны быть выполнены с использованием графического пакета MSVisio.

Литература

1. Ванияшин, С.В. Методы моделирования и оптимизации. Конспект лекций. - Самара.: ФГОБУ ВПО ПГУТИ, 2013. - 83 с.
2. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Кри- щенко. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 496 с.
3. Советов, Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учеб.для вузов/ Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 3-е издание, переработанное и дополненное - М.: Высш. школа, 2001 - 341 с.: ил.
4. Советов, Б.Я. Моделирование систем: Практикум : Учебное пособие для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 2-е издание, переработанное и дополненное. - М.: Высшая школа, 2003. - 295с.
5. Бочаров, П.П. Теория массового обслуживания / П.П. Бочаров, А.В Печинкин. - М., Изд-во. РУДН, 1995. - 529 с.
6. Башарин, Г.П. Лекции по математической теории телетрафика / Г.П. Башарин - М, Изд-во РУДН. 2007. - 270 с.
7. Рыжиков, Ю.И. Имитационное моделирование / Ю.И. Рыжиков. - СП., Изд-во. КОРОНА принт, М., Изд-во. Альтекс-А., 2004. - 380 с.
8. Апанасович, В.В. Цифровое моделирование стохастических систем / В.В. Апанасович, О.М. Тихоненко. - Минск, Изд-во «Университетское», 1986. - 127 с.
9. Бражник, А.Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS World / А.Н. Бражник. - СП., Изд-во Ренеме, 2006 г. - т 440 с.
10. Кудрявцев, Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Е.М. Кудрявцев. - Изд-во ДМК пресс, 2004. - 320 с.

Глоссарий

Имитационное моделирование - Это метод исследования, который основан на том, что анализируемая динамическая система заменяется имитатором и с ним производятся эксперименты для получения об изучаемой системе.

Качество обслуживания (Quality of Service, QoS) - мера производительности передающей системы, отражающая качество передачи и доступность услуг

Маршрутизатор (Router) - сетевое устройство, осуществляющее связь разных типов сетей и обеспечивает доступ к глобальной сети, управляет трафиком на основе протокола сетевого уровня.

Математическая схема - Позволяет рассматривать математику не как метод расчёта, а как метод мышления, средства формулирования понятий, что является наиболее важным при переходе от словесного описания к формализованному представлению процесса её функционирования в виде некоторой математической модели.

Метод имитационного моделирования - Заключается в создании логико-аналитической (математической модели системы и внешних воздействий), имитации функционирования системы, т.е. в определении временных изменений состояния системы под влиянием внешних воздействий и в получении выборок значений выходных параметров, по которым определяются их основные вероятностные характеристики.

Механизм приоритетной обработки трафика (Priority Queue) - алгоритм, предусматривающий разделение всего сетевого трафика на небольшое количество классов с назначением каждому классу приоритета

Моделирование - Замещение одного объекта (оригинала) другим (моделью) и фиксация или изучение свойств оригинала путем исследования свойств модели.

Модель объекта - Это физическая или абстрактная система, адекватно представляющая объект исследования. В теории моделирования используются преимущественно абстрактные модели - описания объекта исследования на некотором языке. Абстрактность модели проявляется в том, что компонентами модели являются не физические элементы, а понятия, в качестве которых наиболее широко используются математические. Абстрактная модель, представленная на языке математических отношений, называется математической моделью.

Мультисервисная сеть - инфраструктура, использующая единый

канал для передачи данных разных типов трафика

Определение маршрута перемещения пакета (маршрутизация) - процесс, использующий таблицы маршрутизации для определения адреса (сетевого уровня) следующего маршрутизатора или непосредственно получателя по имеющемуся адресу (сетевого уровня), после чего выбирается определённый выходной физический порт маршрутизатора

Поток событий - Последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то случайные моменты времени.

Пропускная способность канала - максимально возможная при определённых условиях скорость, при которой информация может передаваться по конкретному тракту связи или каналу

Протокол (сетевой протокол) - набор правил, позволяющий осуществлять соединение и обмен данными между двумя включёнными в сеть компьютерами; набор правил, описывающих формат и назначение пакетов, которыми обмениваются одноранговые сущности

Сервис или услуга (Service) - набор примитивов, которые предоставляются вышележащему уровню нижележащим; описывает интерфейс между двумя уровнями, в котором нижележащий уровень является поставщиком услуги, а вышележащий - её потребителем

Сетевой коммутатор (Switch) - сетевое устройство, предназначенное для соединения нескольких узлов компьютерной сети в пределах одного сегмента и хранящее в памяти таблицу MAC- адресов, в которой указывается соответствие MAC-адреса узла порту коммутатора

Сеть связи - совокупность линий связи и промежуточного оборудования/промежуточных узлов, терминалов/оконечных узлов, предназначенных для передачи информации от отправителя до получателя с заданными параметрами качества обслуживания

Скорость передачи данных - скорость в битах в секунду (бит/с), с которой могут передаваться данные

Стратификация - Это выбор уровня детализации модели.

Теория моделирования - Представляет собой взаимосвязанную совокупность положений, определений, методов и средств создания и изучения моделей. Эти положения, определения, методы и средства, как и сами модели, являются предметом теории моделирования.

Шлюз (Gateway) - сетевое устройство, соединяющее отдельные сегменты сети с разными типами системного и прикладного программного обеспечения