

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра Управление в технических системах**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ Е.И. Луковникова

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕЙ СВЯЗИ**

**Б1.В.18**

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ**

**Многоканальные телекоммуникационные системы**

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b> | <b>3</b>  |
| <b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ</b>  | <b>4</b>  |
| 3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....  | 4         |
| 3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости .....  | 4         |
| <b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>  | <b>5</b>  |
| 4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....   | 5         |
| 4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....   | 7         |
| 4.3 Лабораторные работы.....   | 37        |
| 4.4 Практические занятия.....  | 37        |
| 4.5 Контрольные мероприятия:.....  | 37        |
| <b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>            | <b>38</b> |
| <b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ</b>   | <b>39</b> |
| <b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>  | <b>39</b> |
| <b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>                           | <b>39</b> |
| <b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>  | <b>40</b> |
| 9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ практических работ .....  | 40        |
| <b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>                          | <b>46</b> |
| <b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>                        | <b>46</b> |
| <b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>                                   | <b>47</b> |
| <b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>  | <b>51</b> |
| <b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....</b>  | <b>53</b> |

# 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

## Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к экспериментально-исследовательским видам профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

## Цель дисциплины

Формирование у студентов знаний и навыков по использованию основ математического моделирования, необходимых при проектировании, исследовании и эксплуатации сетей связи.

## Задачи дисциплины

Освоение основных принципов и методов построения математических моделей сетей, формирование навыков проведения вычислительных экспериментов.

| Код компетенции | Содержание компетенций   | Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине   |
|-----------------|--|---|
| ОПК-4           | способностью иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ | <p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Базовое устройство персонального компьютера. Основные информационные процессы, происходящие в персональном компьютере.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Использовать персональный компьютер для самостоятельной работы.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Достаточным уровнем использования универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.</li> </ul> |
| ПК-17           | способностью применять современные теоретические и экспериментальные методы исследования с целью создания новых перспективных средств электросвязи и информатики   | <p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- принципы проектирования математических моделей и связи их элементов.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- собирать и анализировать информацию для формирования исходных данных для проектирования моделей.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- достаточным уровнем использования универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.</li> </ul>                  |

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.18 Моделирование сетей связи относится к вариативной части.

Дисциплина моделирование сетей связи базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин Б1.Б.17 Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, моделирование сетей связи представляет основу для изучения представляет основу для Б1.Б.14 Общая теория связи, Б1.В.14 Сети связи и системы коммутации.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

## 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

### 3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

| Форма обучения                | Курс | Семестр | Трудоемкость дисциплины в часах |                  |        |                     |                      |                        | Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР | Вид промежуточной аттестации |
|-------------------------------|------|---------|---------------------------------|------------------|--------|---------------------|----------------------|------------------------|--|------------------------------|
|                               |      |         | Всего часов                     | Аудиторных часов | Лекции | Лабораторные работы | Практические занятия | Самостоятельная работа |  |                              |
| 1                             | 2    | 3       | 4                               | 5                | 6      | 7                   | 8                    | 9                      | 10   | 11                           |
| Очная                         | 3    | 5       | 108                             | 51               | 17     | -                   | 34                   | 57                     | -  | Зачет                        |
| Заочная                       | -    | -       | -                               | -                | -      | -                   | -                    | -                      | -  | -                            |
| Заочная (ускоренное обучение) | -    | -       | -                               | -                | -      | -                   | -                    | -                      | -  | -                            |
| Очно-заочная                  | -    | -       | -                               | -                | -      | -                   | -                    | -                      | -  | -                            |

### 3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости:

| Вид учебных занятий  | Трудоемкость (час.) | в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.) | Распределение по семестрам, час |
|--|---------------------|--|---------------------------------|
|  |                     |  | 5                               |
| <b>I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)</b> | 51                  | 16   | 51                              |
| Лекции (Лк)  | 17                  | 6  | 17                              |
| Практические работы (ПР)   | 34                  | 10   | 34                              |
| Индивидуальные (групповые) консультации                          | +                   | -  | +                               |

|  |     |   |     |
|--|-----|---|-----|
| <b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b> | 57  | - | 57  |
| Подготовка к практическим работам                  | 27  | - | 27  |
| Подготовка к зачету в течение семестра             | 30  | - | 30  |
| <b>III. Промежуточная аттестация зачет</b>         | +   | - | +   |
| Общая трудоемкость дисциплины ..... час.           | 108 | - | 108 |
| зач. ед.   | 3   | - | 3   |

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий  
- для очной формы обучения:

| № раздела и темы | Наименование раздела и тема дисциплины                        | Трудоемкость, (час.) | Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.) |                     |                                    |
|------------------|---|----------------------|---|---------------------|------------------------------------|
|                  |   |                      | учебные занятия   |                     | самостоятельная работа обучающихся |
|                  |   |                      | лекции  | практические работы |                                    |
| 1                | 2   | 3                    | 4   | 5                   | 6                                  |
| <b>1.</b>        | <b>Основы моделирования систем</b>                            | <b>24</b>            | <b>5</b>  | <b>-</b>            | <b>19</b>                          |
| 1.1.             | Модель и моделирование  | 7                    | 1   | -                   | 6                                  |
| 1.2.             | Классификация моделей   | 8                    | 2   | -                   | 6                                  |
| 1.3.             | Этапы разработки моделей                                      | 9                    | 2   | -                   | 7                                  |
| <b>2.</b>        | <b>Основы теории вероятностей и математической статистики</b> | <b>34</b>            | <b>6</b>  | <b>9</b>            | <b>19</b>                          |
| 2.1.             | Случайные величины и их свойства                              | 5                    | 1   | -                   | 4                                  |
| 2.2.             | Основные законы распределения случайных величин               | 8                    | 2   | -                   | 6                                  |
| 2.3.             | Выходные данные и стохастические процессы моделирования       | 15                   | 1   | 9                   | 5                                  |
| 2.4.             | Планирование экспериментов                                    | 6                    | 2   | -                   | 4                                  |
| <b>3.</b>        | <b>Моделирование компьютерных сетей</b>                       | <b>50</b>            | <b>6</b>  | <b>25</b>           | <b>19</b>                          |

|      |                             |            |           |           |           |
|------|-----------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 3.1. | Аналитическое моделирование | 22         | 3         | 10        | 9         |
| 3.2. | Имитационное моделирование  | 28         | 3         | <b>15</b> | <b>10</b> |
|      | <b>ИТОГО</b>                | <b>108</b> | <b>17</b> | <b>34</b> | <b>57</b> |

## 4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

### 1. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ

#### 1.1. Модель и моделирование

Слово «модель» (от лат. *modelium*) означает «мера», «способ», «сходство с какой-то вещью».

Термин «модель» широко используется в различных сферах человеческой деятельности и имеет множество смысловых значений.

**Модель** – это объект или описание объекта, системы для замещения (при определенных условиях, предложениях, гипотезах) одной системы (т.е. оригинала) другой системой для лучшего изучения оригинала или воспроизведения каких-либо его свойств [1, 8].

**Модель** – это результат отображения одной структуры (изученной) на другую (малоизученную). Любая модель строится и исследуется при определенных допущениях, гипотезах. Модель должна строиться так, чтобы она наиболее полно воспроизводила те качества объекта, которые необходимо изучить в соответствии с поставленной целью [2, 4].

Мы под «моделью» будем понимать некий материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе исследования замещает объект-оригинал так, что его непосредственное изучение дает новые знания об объекте-оригинале.

Во всех отношениях модель должна быть проще объекта и удобнее его для изучения. Таким образом, для одного и того же объекта могут существовать различные модели, классы моделей, соответствующие различным целям его изучения. Необходимым условием моделирования является подобие объекта и его модели. В этом случае мы должны говорить об **адекватности** модели объекту-оригиналу.

Если результаты моделирования подтверждаются и могут служить основой для прогнозирования процессов, протекающих в исследуемых объектах, то говорят, что модель адекватна объекту. При этом адекватность модели зависит от цели моделирования и принятых критериев.

Под адекватной моделью понимается модель, которая с определенной степенью приближения на уровне понимания моделируемой системы разработчиком модели отражает процесс ее функционирования во внешней среде. Под **адекватностью** (от лат. *adaequatus* – приравненный) будем понимать степень соответствия результатов, полученных по разработанной модели, данным эксперимента или тестовой задачи. Если система, для которой разрабатывается модель, существует, то сравнивают выходные данные модели и этой системы. В том случае, когда два набора данных оказываются подобными, модель существующей системы считается адекватной. Чем больше общего между существующей системой и ее моделью, тем больше уверенность в правильности модели системы.

Проверка адекватности модели необходима для того, чтобы убедиться в справедливости совокупности гипотез, сформулированных на первом этапе разработки модели, и точности полученных результатов, требуемых техническим заданием.

Для моделей, предназначенных для приблизительных расчетов, удовлетворительной считается точность 10-15 %, а для моделей, предназначенных для использования в управляющих и контролируемых системах, - 1-2 % [2].

Любая модель обладает следующими свойствами:

- конечностью: модель отображает оригинал лишь в конечном числе его отношений;
- упрощенностью: модель отображает только существенные стороны объекта;

- приближенностью: действительность отображается моделью грубо или приближенно;
- адекватностью: модель успешно описывает моделируемую систему;
- информативностью: модель должна содержать достаточную информацию о системе в рамках гипотез, принятых при построении модели [3].

Процесс построения, изучения и применения моделей будем называть моделированием, т.е. можно сказать, что **моделирование** - это метод исследования объекта путем построения и исследования его модели, осуществляемый с определенной целью, и состоящий в замене оригинала на модель.

**Моделирование** базируется на математической теории подобия, согласно которой абсолютное подобие может иметь место лишь при замене одного объекта другим, точно таким же. При моделировании большинства систем (за исключением, возможно, моделирования одних математических структур другими) абсолютное подобие невозможно, и основная цель моделирования - получить модель, достаточно хорошо отображающую функционирование моделируемой системы [3].

### 1.2. Классификация моделей

В общем случае все модели, независимо от областей и сфер их применения, бывают трех типов: познавательные, прагматические и инструментальные.

**Познавательная модель** - форма организации и представления знаний, средство соединения новых и старых знаний. Познавательная модель обычно подгоняется под реальность и является теоретической моделью.

**Прагматическая модель** - средство организации практических действий, рабочего представления целей системы для ее управления. Реальность в них подгоняется под некоторую прагматическую модель. Это, как правило, прикладные модели.

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

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

Вся остальная классификация моделей выстраивается по отношению к объекту-оригиналу, методам изучения и т.п.

#### 1.2.1. Классификация моделей по степени абстрагирования модели от оригинала

По степени абстрагирования от оригинала (рис. 1.1) модели могут быть разделены на материальные (физические) и идеальные. К **материальным** относятся такие способы, при которых исследование ведется на основе модели, воспроизводящей основные геометрические, физические, динамические и функциональные характеристики изучаемого объекта. Основными разновидностями физических моделей являются [4]:

- натурные;
- квазинатурные;
- масштабные;
- аналоговые.

**Натурные** - это реальные исследуемые системы, которые являются макетами и опытными образцами. Натурные модели имеют полную адекватность с системой-оригиналом, что обеспечивает высокую точность и достоверность результатов моделирования; другими словами, модель натурная, если она есть материальная копия объекта моделирования. Например, глобус - натурная географическая модель земного шара.

**Квазинатурные** (от лат. «квази» - почти) - это совокупность натуральных и математических моделей. Этот вид моделей используется в случаях, когда математическая модель части системы не является удовлетворительной или когда часть системы должна быть исследована во взаимодействии с остальными частями, но их еще не существует либо их включение в модель затруднено или дорого.



Рис. 1.1. Схема классификации моделей по степени абстрагирования от объекта-оригинала

**Масштабные** модели – это системы той же физической природы, что и оригинал, но отличающиеся от него размерами. В основе масштабных моделей лежит математический аппарат теории подобия, который предусматривает соблюдение геометрического подобия оригинала и модели и соответствующих масштабов для их параметров. Примером масштабного моделирования являются любые разработки макетов домов, а порой и целых районов при проведении проектных работ при строительстве. Также масштабное моделирование используется при проектировании крупных объектов в самолетостроении и кораблестроении.

**Аналоговое моделирование** основано на аналогии процессов и явлений, имеющих различную физическую природу, но одинаково описываемых формально (одними и теми же математическими уравнениями, логическими схемами и т.п.). В качестве аналоговых моделей используются механические, гидравлические, пневматические системы, но наиболее широкое применение получили электрические и электронные аналоговые модели, в которых сила тока или напряжение является аналогами физических величин другой природы. Например, является общеизвестным, что математическое уравнение колебания маятника имеет эквивалент при записи уравнения колебаний тока.

**Идеальное моделирование** носит теоретический характер. Различают два типа идеального моделирования: интуитивное и знаковое.

Под **интуитивным** будем понимать моделирование, основанное на интуитивном представлении об объекте исследования, не поддающемся формализации либо не нуждающимся в ней. В этом смысле, например, жизненный опыт каждого человека может считаться его интуитивной моделью окружающего мира.

**Знаковым** называется моделирование, использующее в качестве моделей знаковые преобразования различного вида: схемы, графики, чертежи, формулы, наборы символов и т.д., включающие совокупность законов, по которым можно оперировать с выбранными знаковыми элементами. Знаковая модель может делиться на лингвистическую, визуальную, графическую и математическую модели.

Модель *лингвистическая*, если она представлена некоторым лингвистическим объектом, формализованной языковой системой или структурой. Иногда такие модели называют вербальными, например, правила дорожного движения - языковая, структурная модель движения транспорта и пешеходов на дорогах.

Модель *визуальная*, если она позволяет визуализировать отношения и связи моделируемой системы, особенно в динамике. Например, на экране компьютера часто пользуются визуальной моделью объектов, клавиатуры в программном тренажере по обучению работе на клавиатуре.

Модель *графическая*, если она представлена геометрическими образами и объектами, например, макет дома является натурной геометрической моделью строящегося дома.

Важнейшим видом знакового моделирования является *математическое* моделирование, классическим примером математического моделирования является описание и исследование основных законов механики И. Ньютона средствами математики.

### **Классификация математических моделей**

Математические модели классифицируются:

- по принадлежности к иерархическому уровню;
- характеру отображаемых свойств объекта;
- способу представления свойств объекта;
- способу получения модели;
- форме представления свойств объекта;
- по содержанию вероятностных компонентов.

• **По принадлежности к иерархическому уровню** математические модели делятся на модели микроуровня, макроуровня, метаяуровня (рис. 1.2).

Математические модели на *микроуровне* процесса отражают физические процессы, протекающие, например, при резании металлов. Они описывают процессы на уровне перехода (прохода).

Математические модели на *макроуровне* процесса описывают технологические процессы.

Математические модели на *метаяуровне* процесса описывают технологические системы (участки, цехи, предприятие в целом).



Рис. 1.2. Схема классификации математических моделей по принадлежности к иерархическому уровню

• **По характеру отображаемых свойств объекта** модели можно классифицировать на структурные и функциональные (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Схема классификации математических моделей по характеру отображаемых свойств объекта

Модель **структурная**, если она представима структурой данных или структурами данных и отношениями между ними; например, структурной моделью может служить описание (табличное, графовое, функциональное или другое) трофической структуры экосистемы. В свою очередь, структурная модель может быть иерархической или сетевой.

Модель **иерархическая** (древовидная), если представима некоторой иерархической структурой (деревом); например, для решения задачи нахождения маршрута в дереве поиска можно построить древовидную модель, приведенную на рис. 1.4.

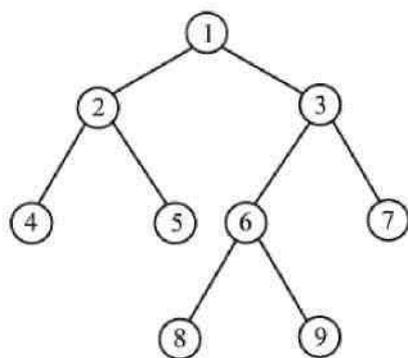


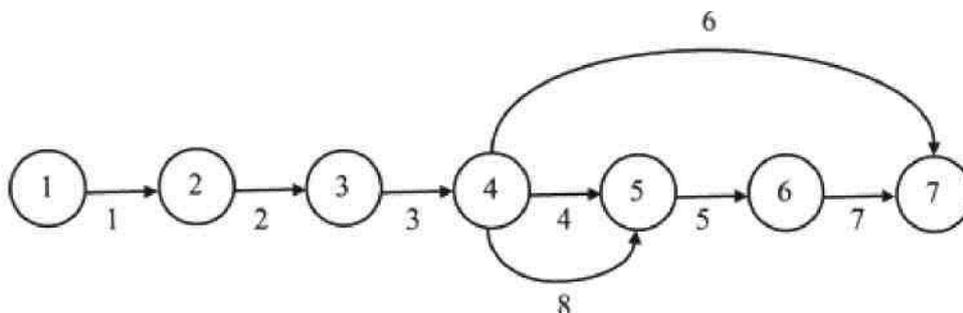
Рис. 1.4. Модель иерархической структуры

Модель **сетевая**, если она представима некоторой сетевой структурой. Например, строительство нового дома включает операции, приведенные в нижеследующей таблице. Эти операции можно представить в виде сетевой модели, приведенной на рис. 1.5 и в табл. 1.1.

Модель *функциональная*, если она представлена в виде системы

Таблица работ при строительстве дома

| № | Операция                   | Время выполнения (дни) | Предшествующие операции    | Дуги графа |
|---|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------|
| 1 | Расчистка участка          | 1                      | Нет                        | –          |
| 2 | Закладка фундамента        | 4                      | Расчистка участка (1)      | 1–2        |
| 3 | Возведение стен            | 4                      | Закладка фундамента (2)    | 2–3        |
| 4 | Монтаж электропроводки     | 3                      | Возведение стен (3)        | 3–4        |
| 5 | Штукатурные работы         | 4                      | Монтаж электропроводки (4) | 4–5        |
| 6 | Благоустройство территории | 6                      | Возведение стен (3)        | 3–6        |
| 7 | Отделочные работы          | 4                      | Штукатурные работы (5)     | 5–7        |
| 8 | Настил крыши               | 5                      | Возведение стен (3)        | 3–8        |



функциональных соотношений. Например, закон Ньютона и модель производства товаров - функциональные.

• *По способу представления свойств объекта* (рис. 1.6) модели делятся на аналитические, численные, алгоритмические и имитационные [2, 4, 6, 8, 16].



Рис. 1.6. Схема классификации математических моделей по способу представления свойств объекта

*Аналитические* математические модели представляют собой явные математические выражения выходных параметров как функций от параметров входных и внутренних и имеют единственные решения при любых начальных условиях. Например, процесс резания (точения) с точки зрения действующих сил представляет собой аналитическую модель. Также квадратное уравнение, имеющее одно или несколько решений, будет аналитической моделью.

Модель будет **численной**, если она имеет решения при конкретных начальных условиях (дифференциальные, интегральные уравнения).

Модель **алгоритмическая**, если она описана некоторым алгоритмом или комплексом алгоритмов, определяющим ее функционирование и развитие. Введение данного типа моделей (действительно, кажется, что любая модель может быть представлена алгоритмом ее исследования) вполне обосновано, т.к. не все модели могут быть исследованы или реализованы алгоритмически. Например, моделью вычисления суммы бесконечного убывающего ряда чисел может служить алгоритм вычисления конечной суммы ряда до некоторой заданной степени точности. Алгоритмической моделью корня квадратного из числа  $X$  может служить алгоритм вычисления его приближенного, сколь угодно точного значения по известной рекуррентной формуле.

Модель **имитационная**, если она предназначена для испытания или изучения возможных путей развития и поведения объекта путем варьирования некоторых или всех параметров модели, например модель экономической системы производства товаров двух видов. Такую модель можно использовать в качестве имитационной с целью определения и варьирования общей стоимости в зависимости от тех или иных значений объемов производимых товаров.

• **По способу получения модели** делятся на теоретические и эмпирические (рис. 1.7).

**Теоретические** математические модели создаются в результате исследования объектов (процессов) на теоретическом уровне. Например, существуют выражения для сил резания, полученные на основе обобщения физических законов. Но они неприемлемы для практического использования, т.к. очень громоздки и не совсем адаптированы к реальным процессам обработки материалов.



Рис. 1.7. Схема классификации математических моделей по способу получения модели

**Эмпирические** математические модели создаются в результате проведения экспериментов (изучения внешних проявлений свойств объекта с помощью измерения его параметров на входе и выходе) и обработки их результатов методами математической статистики.

• **По форме представления свойств объекта** модели делятся на логические, теоретико-множественные и графовые (рис. 1.8).

Модель **логическая**, если она представлена предикатами, логическими функциями, например совокупность двух логических функций может служить математической моделью одноразрядного сумматора.

Модель **теоретико-множественная**, если она представлена с помощью некоторых множеств и отношений принадлежности к ним и между ними.

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



Рис. 1.8. Схема классификации математических моделей по форме представления свойств объекта

• **По содержанию вероятностных компонентов** модели делятся на детерминированные и стохастические (рис. 1.9).

Если модель не содержит вероятностных (стохастических) компонентов, она называется **детерминированной**. Примером такой модели является система дифференциально-разностных уравнений, описывающих химическую реакцию либо класс систем, описываемых уравнениями в частных производных параболического типа. В детерминированной модели результат можно получить, когда для нее заданы все входные величины.

Однако множество систем моделируются с несколькими случайными входными величинами, в результате чего создается **стохастическая (вероятностная)** модель. Примерами таких моделей являются системы массового обслуживания и управления запасами. Стохастические модели выдают результат, который является случайным сам по себе, и поэтому может он рассматриваться как оценка истинных характеристик модели [9].



Рис. 1.9. Схема классификации математических моделей по содержанию вероятностных компонентов

### 1.2.2. Классификация моделей по степени устойчивости

Все модели могут быть разделены на устойчивые и неустойчивые.

**Устойчивой** является такая система, которая, будучи выведена из своего исходного состояния, стремится к нему. Она может колебаться некоторое время около исходной точки подобно обычному маятнику, приведенному в движение, но возмущения в ней со временем затухают и исчезают.

В **неустойчивой** системе, находящейся первоначально в состоянии покоя, возникшее возмущение усиливается, вызывая увеличение значений соответствующих переменных или их колебания с возрастающей амплитудой.

### 1.2.3. Классификация моделей по отношению к внешним факторам

По отношению к внешним факторам модели могут быть разделены на открытые и замкнутые.

**Замкнутой** моделью является модель, которая функционирует вне связи с внешними (экзогенными) переменными. В замкнутой модели изменения значений переменных во

времени определяются внутренним взаимодействием самих переменных. Замкнутая модель может выявить поведение системы без ввода внешней переменной. Пример: информационные системы с обратной связью являются замкнутыми системами. Это самонастраивающиеся системы, и их характеристики вытекают из внутренней структуры и взаимодействий, которые отражают ввод внешней информации.

Модель, связанная с внешними (экзогенными) переменными, называется **открытой**.

#### 1.2.4. Классификация моделей по отношению ко времени

Существуют две классификации моделей по отношению к временному фактору. Модели могут быть:

- непрерывными или дискретными;
- статическими или динамическими.

**Непрерывная** модель описывает систему во времени с помощью представления, в котором переменные состояния меняются непрерывно по отношению ко времени. Примером непрерывной модели является сложная система дифференциальных уравнений, которые устанавливают отношения для скоростей изменения переменных состояния во времени. В **дискретной** модели значения переменных можно определить только в конкретные моменты времени [6].

По отношению к временному фактору модели делятся на динамические и статические (рис. 1.10).

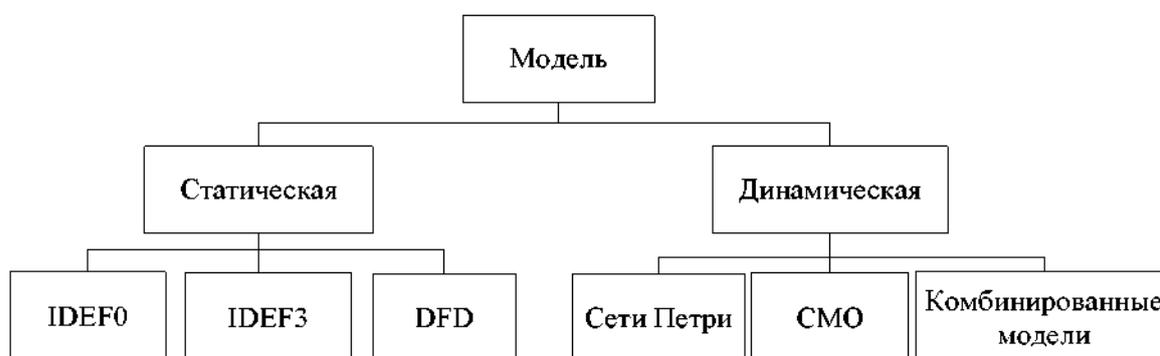


Рис. 1.10. Схема классификации математических моделей по отношению ко времени

Модель называется **статической**, если среди параметров, участвующих в ее описании, нет временного параметра. Статическая модель в каждый момент времени дает лишь «фотографию» системы, ее срез. Одним из видов статических моделей являются структурные модели.

**Динамической** моделью называется модель, если среди ее параметров есть временной параметр, т.е. она отображает систему (процессы в системе) во времени.

#### 1.3. Этапы разработки моделей

Процесс моделирования имеет итерационный характер и проводится в рамках ранее сформулированных целей и с соблюдением границ моделирования. Построение начинается с изучения (обследования) реальной системы, ее внутренней структуры и содержания взаимосвязей между ее элементами, а также внешних воздействий, и завершается разработкой модели.

Моделирование – от постановки задачи до получения результатов – проходит следующие этапы:

##### I. Анализ требований и проектирование:

1. Постановка и анализ задачи и цели моделирования.
2. Сбор и анализ исходной информации об объекте моделирования.

3. Построение концептуальной модели.
4. Проверка достоверности концептуальной модели.

**II. Разработка модели:**

1. Выбор среды моделирования.
2. Составление логической модели.
3. Назначение свойств модулям модели.
4. Задание модельного времени.
5. Верификация модели.

**III. Проведение эксперимента:**

1. Запуск модели, прогон модели.
2. Варьирование параметров модели и сбор статистики.
3. Анализ результатов моделирования.

**IV. Подведение итогов моделирования согласно поставленной цели и задачи моделирования**

Схема этапов моделирования представлена на рис. 1.11.



Рис. 1.11. Схема создания модели

Необходимо отметить, что при разработке конкретных моделей с определенными целями и границами моделирования необязательно все подэтапы должны выполняться. Например, при разработке статических моделей IDEF0, DFD 3 и 4 подэтапы «Разработки модели» не выполняются, т.к. эти методологии не предусматривают задание временных параметров модели.

На первом этапе моделирования – «Анализ требований и проектирование» – формулируется концептуальная модель, строится ее формальная схема и решается вопрос об эффективности и целесообразности моделирования системы.

Концептуальная модель (КМ) – это абстрактная модель, определяющая состав и структуру системы, свойства элементов и причинно-следственные связи, присущие анализируемой системе и существенные для достижения целей моделирования. В таких моделях обычно в словесной форме приводятся сведения о природе и параметрах (характеристиках) элементарных явлений исследуемой системы, о виде и степени взаимодействия между ними, о месте и значении каждого элементарного явления в общем процессе функционирования системы. При создании

КМ практически параллельно формируется область исходных данных (информационное пространство системы) – этап подготовки исходных данных. На данном этапе выявляются количественные характеристики (параметры) функционирования системы и ее элементов, численные значения которых составят исходные данные для моделирования. Очевидно, что значительная часть параметров системы – это случайные величины. Поэтому особое значение при формировании исходных данных имеют выбор законов распределения случайных величин, аппроксимация функций и т.д. В результате выявления свойств модели и построения концептуальной модели необходимо проверить адекватность модели.

На втором этапе моделирования – «Разработка модели» – происходит уточнение или выбор программного пакета моделирования. Выбор средств моделирования: программные и технические средства выбираются с учетом ряда критериев. Непременное условие при этом – достаточность и полнота средств для реализации концептуальной модели. Среди других критериев можно назвать доступность, простоту и легкость освоения, скорость и корректность создания программной модели.

После выбора среды проектирования концептуальная модель, сформулированная на предыдущем этапе, воплощается в компьютерную модель, т.е. решается проблема алгоритмизации и детализации модели.

Модель системы представляется в виде совокупности частей (элементов, подсистем). В эту совокупность включаются все части, которые обеспечивают сохранение целостности системы, с одной стороны, а с другой – достижение поставленных целей моделирования (получения необходимой точности и достоверности результатов при проведении компьютерных экспериментов над моделью). В дальнейшем производится окончательная детализация, локализация (выделение системы из окружающей среды), структуризация (указание и общее описание связей между выделенными элементами системы), укрупненное описание динамики функционирования системы и ее возможных состояний.

Для того чтобы выполнить подэтап «Задание модельного времени», введем понятие модельного времени. В компьютерной модели переменная, обеспечивающая текущее значение модельного времени, называется *часами модельного времени*.

Существует два основных подхода к продвижению модельного времени: *продвижение времени от события к событию* и *продвижение времени с постоянным шагом* [6].

Подход, использующий продвижение времени в модели от события к событию, применяется всеми основными компьютерными программами и большинством разработчиков, создающих свои модели на универсальных языках (рис. 1.12) [6].

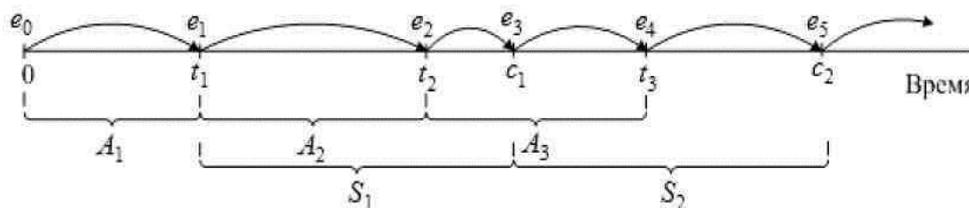


Рис. 1.12. Механизм продвижения модельного времени от события к событию

При использовании продвижения времени от события к событию часы модельного времени в исходном состоянии устанавливаются в 0, и определяется время возникновения будущих событий. После этого часы модельного времени переходят на время возникновения ближайшего события, и в этот момент

обновляются состояние системы, с учетом произошедшего события, а также сведения о времени возникновения будущих событий. Затем часы модельного времени продвигаются ко времени возникновения следующего нового ближайшего события, обновляется состояние системы и определяется время будущих событий и т.д. Процесс продвижения модельного времени от времени возникновения одного события ко времени возникновения другого продолжается до тех пор, пока не будет выполнено какое-либо условие останова, указанное заранее. Поскольку в дискретно-событийной имитационной модели все изменения происходят только во время возникновения событий, периоды бездействия системы просто пропускаются, и часы переводятся со времени возникновения одного события на время возникновения другого. При продвижении времени с постоянным шагом такие периоды бездействия не пропускаются, что приводит к большим затратам компьютерного времени. Следует отметить, что длительность интервала продвижения модельного времени от одного события к другому может быть различной [6].

При продвижении времени с постоянным шагом  $\Delta t$  часы модельного времени продвигаются точно на  $\Delta t$  единиц времени для какого-либо соответствующего выбора

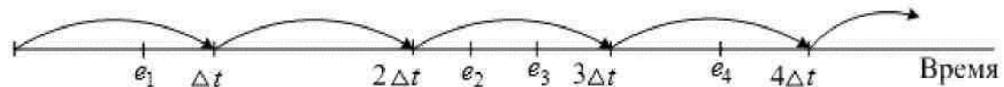


Рис. 1.13. Пример продвижения модельного времени посредством постоянного шага

значения  $\Delta t$ . После каждого обновления часов выполняется проверка, чтобы определить, произошли какие-либо события в течение предыдущего интервала времени  $\Delta t$  или нет. Если на этот интервал запланированы одно или несколько событий, считается, что данные события происходят в конце интервала, после чего состояние системы и статистические счетчики соответствующим образом обновляются. Продвижение времени посредством постоянного шага показано на рис. 1.13, где изогнутые стрелки показывают продвижение часов модельного времени, а  $e_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) - это действительное время возникновения события  $i$  любого типа, а не значение часов модельного времени. На интервале  $[0, \Delta t)$  событие происходит в момент времени  $e_1$ , но оно рассматривается как произошедшее в момент времени  $\Delta t$ . На интервале  $[\Delta t, 2\Delta t)$  события не происходят, но все же модель выполняет проверку, чтобы убедиться в этом. На интервале  $[2\Delta t, 3\Delta t)$  события происходят в моменты времени  $e_2$  и  $e_3$ , однако считается, что они произошли в момент времени  $3\Delta t$  и т.д. В ситуациях, когда принято считать, что два или несколько событий происходят в одно и то же время, необходимо применение ряда правил, позволяющих определять, в каком порядке обрабатывать события. Таким образом, продвижение времени посредством постоянного шага имеет два недостатка: возникновение ошибок, связанных с обработкой событий в конце интервала, в течение которого они происходят, а также необходимость решать, какое событие обрабатывать первым, если события, в действительности происходящие в разное время, рассматриваются как одновременные. Подобного рода проблемы можно частично решить, сделав интервалы  $\Delta t$  менее продолжительными, но тогда возрастает число проверок возникновения событий, что приводит к увеличению времени выполнения задачи. Принимая во внимание это обстоятельство, продвижение времени с помощью постоянного шага не используют в дискретно-событийных имитационных моделях, когда интервалы времени между последовательными событиями могут значительно отличаться по своей продолжительности [6].

В основном этот подход предназначен для систем, в которых можно допустить, что все события в действительности происходят в один из моментов  $n$  времени  $At$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) для соответственно выбранного  $At$ . Так, в экономических системах данные часто предоставляются за годичные промежутки времени, поэтому естественно в имитационной модели установить продвижение времени с шагом, равным одному году. Следует заметить, что продвижение времени посредством постоянного шага может быть выполнено с помощью механизма продвижения времени от события к событию, если планировать время возникновения событий через  $At$  единиц времени, т.е. данный подход является разновидностью механизма продвижения времени от события к событию.

Третий этап - «Проведение эксперимента» - является решающим, на котором, благодаря процессу имитации моделируемой системы, происходит сбор необходимой информации, ее статической обработки в интерпретации результатов моделирования, в результате чего принимается решение: либо исследование будет продолжено, либо закончено. Если известен результат, то можно сравнить его с полученным результатом моделирования. Полученные выводы часто способствуют проведению дополнительной серии экспериментов, а иногда и изменению модели. Основой для выработки решения служат результаты тестирования и экспериментов. Если результаты не соответствуют целям моделирования (реальному объекту или процессу), значит, допущены ошибки на предыдущих этапах или входные данные не являются лучшими параметрами в изучаемой области, поэтому разработчик возвращается к одному из предыдущих этапов.

Подэтап «Анализ результатов моделирования» представляет собой всесторонний анализ полученных результатов с целью получения рекомендаций по проектированию системы или ее модификации.

На этапе «Подведение итогов моделирования согласно поставленной цели и задачи моделирования» проводят оценку проделанной работы, сопоставляют поставленные цели с полученными результатами и создают окончательный отчет по выполненной работе.

## **2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ**

Вид занятия в интерактивной форме обучения: рассмотреть варианты законов распределения на примерах.

Для успешного исследования системы посредством моделирования недостаточно просто создать блок-схему системы, преобразовать ее в компьютерную программу и выполнить один или несколько повторных прогонов для каждой из предложенных конфигураций. Такое исследование требует задания математических параметров модели, что невозможно сделать без применения теории вероятностей и статистики. В частности, теория вероятностей и статистика нужны, чтобы понимать, как моделируется вероятностная система, проверять достоверность имитационной модели, выбирать входные распределения вероятностей, генерировать случайные выборки из этих распределений, выполнять статистический анализ выходных данных моделирования и планировать имитационные эксперименты.

### **2.1. Случайные величины и их свойства**

*Эксперимент* это процесс, результат которого точно не известен. Совокупность всех возможных результатов эксперимента называется *пространством выборки* и обозначается  $S$ . Сами результаты называются *элементами выборки* в пространстве выборки [6, 9, 17].

*Случайная величина* это функция (или правило), которая определяет вещественное число (любое число больше  $-oo$  и меньше  $oo$ ) каждому элементу в

пространстве выборки  $S$  [17, 18]. Случайные величины обозначают прописными буквами  $X, Y, Z$ , а значения, которые принимают случайные величины, строчными буквами  $x, y, z$ .

Функция распределения вероятностей (иногда именуемая также интегральной функцией распределения вероятностей)  $F(x)$  случайной величины  $X$  определяется для каждого вещественного числа  $x$  следующим образом:

$$F(x) = P(X \leq x) \text{ для } -\infty < x < \infty,$$

Случайные величины  $X$  и  $Y$  называются *совместно непрерывными*, если для них существует неотрицательная функция  $f(x, y)$ , именуемая *совместной функцией плотности распределения вероятностей* величин  $X$  и  $Y$ , определенная для всех множеств вещественных чисел  $A$  и  $B$

Иными словами, случайные величины  $X$  и  $Y$  (как дискретные, так и непрерывные) являются независимыми, если известное значение, которое может принимать одна величина, не сказывается на распределении другой величины. Также, если величины  $X$  и  $Y$  не являются независимыми, их называют *зависимыми*.

## 2.2. Основные законы распределения случайных величин

### 2.2.1. Нормальное распределение

Непрерывная случайная величина  $X$  имеет нормальный закон распределения. Кривая нормального распределения  $f(x)$  (нормальная кривая или кривая Гаусса) приведена на рис. 2.1.

Нормальный закон распределения случайной величины с параметрами  $a = 0$  и  $\sigma = 1$  называется стандартным или *нормированным*, а соответствующая нормальная кривая - *стандартной* или *нормированной*.

Математическое ожидание случайной величины  $X$ , распределённой по нормальному закону, равно параметру  $a$  этого закона, а её дисперсия - квадрату параметра  $\sigma$ , т.е.  $M(X) = a, D(X) = \sigma^2$ .

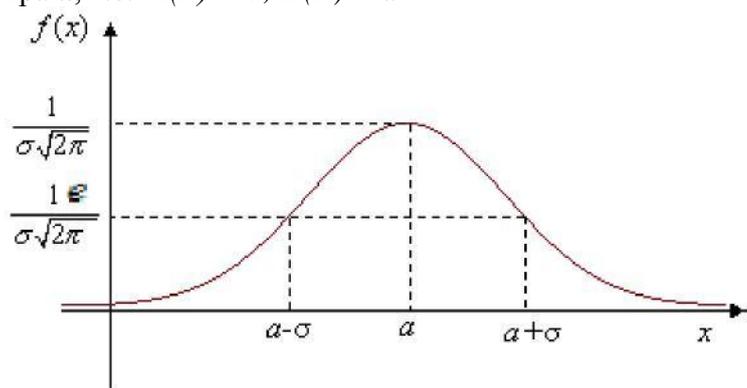


Рис. 2.1. Кривая нормального распределения

Наиболее важные свойства случайной величины, распределённой по нормальному закону:

1. Вероятность попадания случайной величины в интервал  $(x_1, x_2)$ , равна

$$P(x_1 < X < x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1), \quad (2.21)$$

2. Вероятность того, что отклонение случайной величины  $X$ , распределённой по нормальному закону, от математического ожидания  $a$  не превысит по абсолютной величине величину  $A > 0$ , равна

$$P(|X - a| < A) = 2\Phi(t), \quad (2.22)$$

3. «Правило трёх сигм». Если случайная величина  $X$  распределена нормально (с параметрами  $a$  и  $\sigma$ ), то практически достоверно, что абсолютная величина её отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратического отклонения

4. Если случайная величина  $X$  имеет нормальный закон распределения с параметрами  $a$  и  $\sigma$ , то практически достоверно, что её значения заключены в интервале  $(a - 3\sigma, a + 3\sigma)$ .

5. Коэффициент асимметрии и эксцесс нормально распределённой случайной величины равны нулю [19].

Нормальный закон распределения наиболее часто встречается на практике. Главная особенность, выделяющая его среди других законов, состоит в том, что он является предельным законом, к которому приближаются другие законы при весьма часто встречающихся типичных условиях.

### 2.2.2. Биномиальный закон распределения

Дискретная случайная величина  $X$  имеет биномиальный закон распределения, если она принимает значения  $0, 1, 2, \dots, m, \dots, n$  с вероятностями

$$P(X = m) = C_n^m p^m q^{n-m} \quad (2)$$

24)

где  $0 < p < 1, q = 1 - p, m = 0, 1, 2, \dots, n$ .

Биномиальный закон распределения представляет собой закон распределения числа  $X = m$  наступлений события  $A$  в  $n$  независимых испытаниях, в каждом из которых событие  $A$  может осуществиться с одной и той же вероятностью  $P(A) = p = \text{const}$ . Кроме

|       |       |                   |                     |     |                     |     |       |
|-------|-------|-------------------|---------------------|-----|---------------------|-----|-------|
| $x_i$ | 0     | 1                 | ...                 | 2   | $m$                 | ... | $n$   |
| $P_i$ | $q^n$ | $C_n^1 p q^{n-1}$ | $C_n^2 p^2 q^{n-2}$ | ... | $C_n^m p^m q^{n-m}$ | ... | $p^n$ |

события  $A$  может произойти также противоположное событие  $\bar{A}$ , вероятность которого  $P(\bar{A}) = 1 - p = q$ .

Ряд распределения биномиального закона имеет вид:

Вероятности любого числа событий соответствуют членам разложения бинома Ньютона в степени, равной числу испытаний

На рис. 2.2 приведены многоугольники (полигоны) распределения случайной величины  $X$ , имеющей биномиальный закон распределения с параметрами  $n = 5$  и  $p$  (для  $p = 0,2; 0,3; 0,5; 0,7; 0,8$ ).

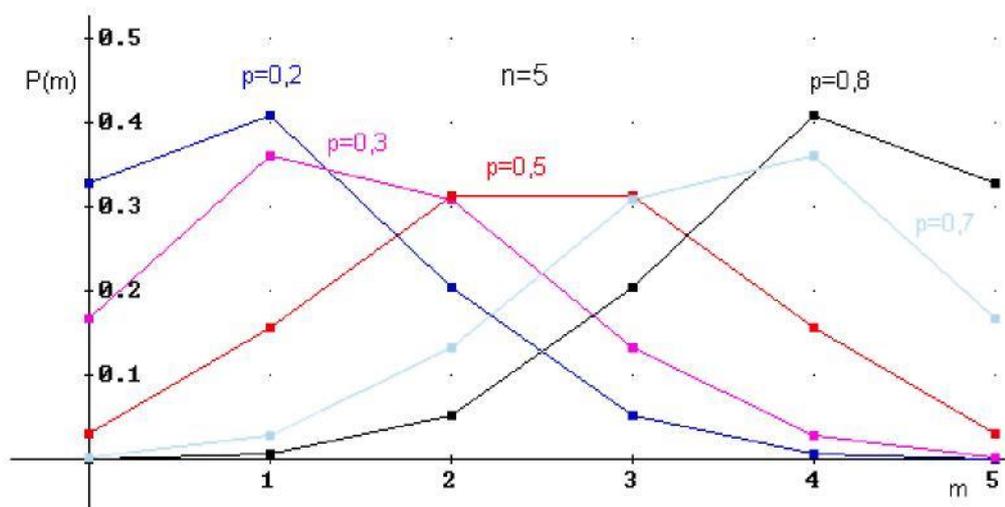


Рис. 2.2. Кривые биномиального распределения

Биномиальный закон широко используется в теории и практике статистического контроля качества продукции, при описании функционирования систем массового обслуживания, в теории стрельбы и в других областях [7].

### 2.2.3. Закон распределения Пуассона

Дискретная случайная величина  $X$  имеет закон распределения Пуассона, если она принимает значения  $0, 1, 2, \dots, m, \dots$  (бесконечное, но счётное множество значений) с вероятностями

Ряд распределения закона Пуассона имеет вид:

|       |                |                        |                                     |     |                                     |     |
|-------|----------------|------------------------|-------------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|
| $x_i$ | 0              | 1                      | 2                                   | ... | $m$                                 | ... |
| $p_i$ | $e^{-\lambda}$ | $\lambda e^{-\lambda}$ | $\frac{\lambda^2 e^{-\lambda}}{2!}$ | ... | $\frac{\lambda^m e^{-\lambda}}{m!}$ | ... |

На рис. 2.3 приведены многоугольники (полигоны) распределения случайной величины  $X$ , имеющей закон распределения Пуассона с параметром  $\lambda$ , (для  $\lambda = 0,5; 1; 2; 3,5; 5$ ).

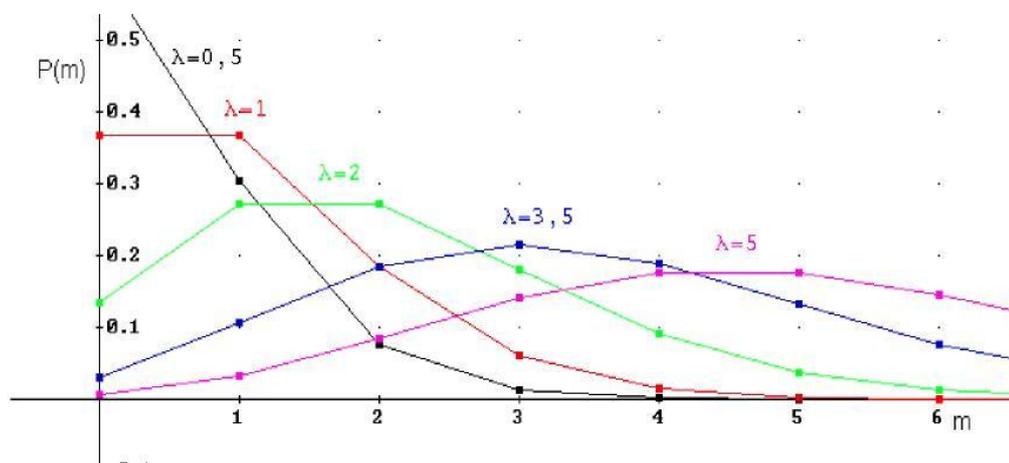


Рис. 2.3. Кривые распределения Пуассона

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины  $X$ , распределённой по закону Пуассона, совпадают и равны значению параметра этого закона, т.е.  $M(X) = \lambda, D(X) = \lambda$ .

Закон распределения Пуассона является предельным случаем биномиального закона. Так как при этом вероятность  $p$  события  $A$  в каждом испытании мала, то закон распределения Пуассона называют часто *законом редких явлений*.

Наряду с «предельным» случаем биномиального распределения закон Пуассона может возникнуть и в ряде других случаев. Так для простейшего потока событий число событий, попадающих на произвольный отрезок времени, есть случайная величина, имеющая пуассоновское распределение. Также по закону Пуассона распределены, например: число рождений четверней, число сбоев на автоматической линии, число отказов сложной системы в «нормальном режиме», число «требований на обслуживание», поступивших в единицу времени в системах массового обслуживания, и др.

Если случайная величина представляет собой сумму двух независимых случайных величин, распределённых по закону Пуассона, то она также распределена по закону Пуассона [19].

### 2.2.4. Равномерный закон распределения

Непрерывная случайная величина  $X$  имеет равномерный закон распределения на отрезке  $[a, B]$ , если её плотность вероятности постоянна на этом отрезке и равна нулю вне его, т.е.

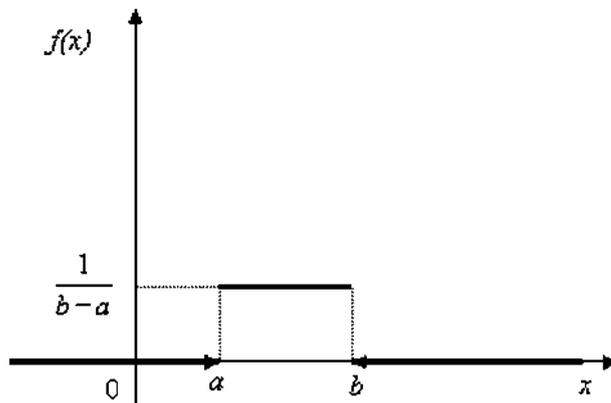


Рис. 2.4. Равномерный закон распределения

График функции распределения  $F(x)$  равномерно распределённой случайной величины  $X$  представлен на рис. 2.5.

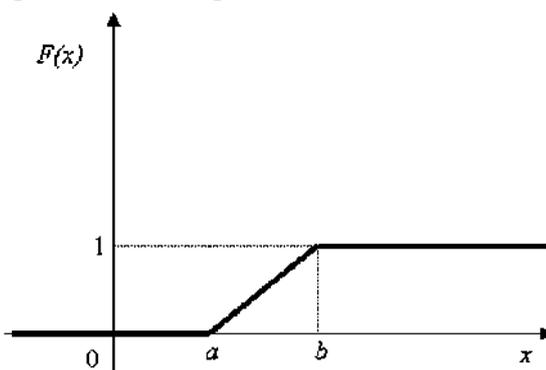


Рис. 2.5. График функции распределения  $F(x)$  равномерно распределённой случайной величины  $X$

Равномерный закон распределения используется при анализе ошибок округления при проведении числовых расчётов (например, ошибка округления числа до целого распределена равномерно на отрезке  $[-0,5; 0,5]$ ), в ряде задач массового обслуживания, при статистическом моделировании наблюдений, подчинённых заданному распределению. Так, случайная величина  $X$ , распределённая равномерно на отрезке  $[0; 1]$ , называемая «случайным числом от 0 до 1», служит исходным материалом для получения случайных величин с любым законом распределения [9].

### 2.2.5. Экспоненциальный закон распределения

Непрерывная случайная величина  $X$  имеет экспоненциальный (показательный) закон распределения с параметром  $X$ , если её плотность вероятности  $f(x)$  Кривая распределения  $f(x)$  приведена на рис. 2.6.

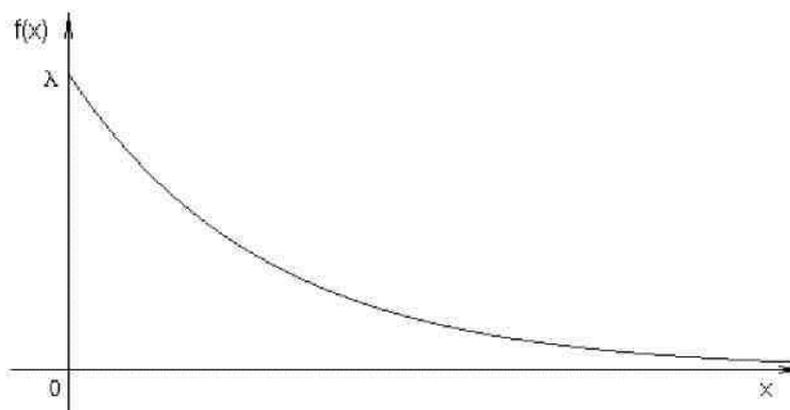


Рис. 2.6. Кривая экспоненциального распределения  
 Функция распределения случайной величины  $X$ , распределённой по  
 График функции распределения  $F(x)$  случайной величины  $X$ , имеющей  
 экспоненциальное распределение представлен на рис. 2.7.

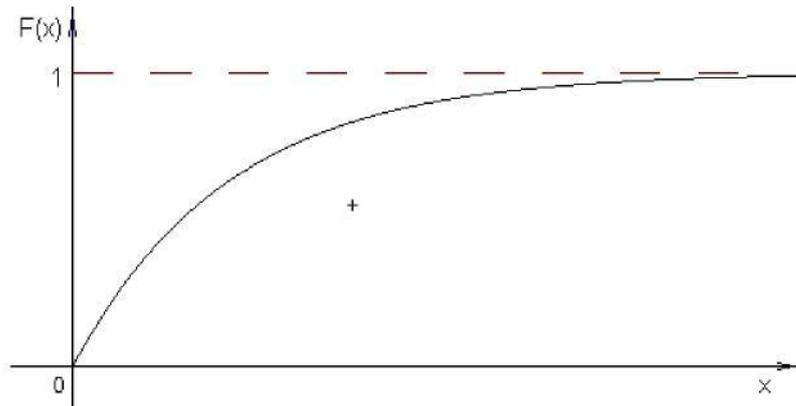


Рис. 2.7. График функции распределения  $F(x)$  случайной величины  $X$ , имеющей экспоненциальное распределение

Экспоненциальный закон распределения играет большую роль в теории массового обслуживания и теории надёжности. Так, например, интервал времени  $T$  между двумя соседними событиями в простейшем потоке событий имеет экспоненциальное распределение с параметром  $X$  - интенсивностью потока [17].

### 2.2.6. Геометрическое распределение

Дискретная случайная величина  $X$  имеет геометрическое распределение, если она принимает значения  $1, 2, \dots, m, \dots$  (бесконечное, но счётное множество значений) с вероятностями

$$P(X=m) = pq^{m-1}, \quad (2.37)$$

где  $0 < p < 1, q = 1 - p, m = 1, 2, \dots$

Ряд геометрического распределения имеет вид:

|       |     |      |        |     |            |     |
|-------|-----|------|--------|-----|------------|-----|
| $x_i$ | 1   | 2    | 3      | ... | m          | ... |
| $p_i$ | $p$ | $pq$ | $pq^2$ | ... | $pq^{m-1}$ | ... |

Очевидно, что вероятности  $p_i$  образуют геометрическую прогрессию с первым членом  $p$  и знаменателем  $q$  (отсюда и название «геометрическое распределение»).

Случайная величина  $X = m$ , имеющая геометрическое распределение, представляет собой число  $m$  испытаний, проведённых по схеме Бернулли, с вероятностью  $p$  наступления события в каждом испытании до первого положительного исхода.

### 2.2.7. Треугольное распределение (распределение Симпсона)

Случайная величина  $\xi$  имеет треугольное распределение (распределение Симпсона) на отрезке  $[a, b]$  ( $a < b$ ), если ее плотность вероятности вычисляется по формуле

Треугольное распределение часто используется при моделировании случайных явлений при отсутствии достаточных данных, позволяющих сформулировать гипотезу об ином распределении. Однако использование треугольного распределения ограничивает исследователя невозможностью

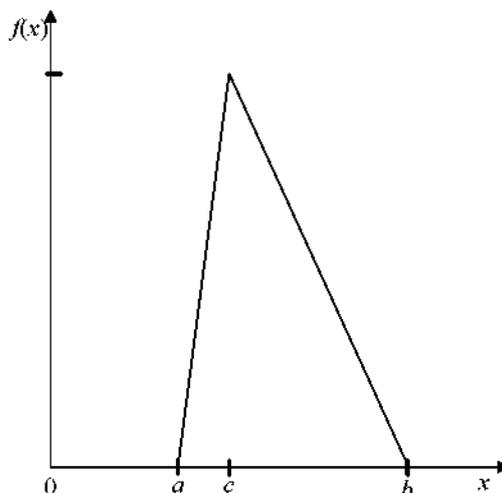


Рис. 2.8. Функция плотности распределения вероятностей треугольного распределения

независимого варьирования такими параметрами как мода, медиана, математическое ожидание [13].

### 2.3. Выходные данные и стохастические процессы моделирования

В большинстве имитационных моделей в качестве входных данных используются случайные величины, поэтому выходные данные имитационного моделирования также носят случайный характер. В связи с этим нужно осторожно делать выводы относительно действительных характеристик модели (например, об ожидаемой средней задержке требований в системе массового обслуживания). Правильное проведение анализа выходных данных невозможно без ознакомления со стохастическими процессами.

*Стохастический процесс* представляет совокупность «однородных» случайных величин, которые упорядочены во времени и определены в общем, выборочном пространстве. Множество всех возможных значений, которые могут принимать эти случайные величины, называется *пространством состояний*. Если совокупность величин представлена как  $X_1, X_2, \dots$ , то речь идет о *дискретном* стохастическом процессе, если же как  $\{X(t), t > 0\}$ , то о *непрерывном* [17].

Иногда, для того чтобы сделать статистические выводы о стохастическом процессе по совокупности выходных данных, необходимо принять относительно него допущения, которые на практике не являются строго справедливыми (без таких допущений статистический анализ выходных данных может оказаться невыполнимым). Например, можно допустить, что стохастический процесс является ковариационно стационарным.

Таким образом, для ковариационно стационарного процесса среднее значение и дисперсия являются неизменными в течение всего времени (общее среднее значение и общая дисперсия обозначаются соот-

ответственно как  $\mathbf{i}$  и  $a^2$ ), а ковариация между двумя наблюдениями  $X_i$  и  $X_j$  зависит только от интервала  $j$ , а не от действительных значений времени  $i$  и  $i + j$ .

Для ковариационно стационарного процесса ковариация и корреляция между  $X_i$  и  $X_{i+j}$  обозначаются соответственно как  $C_j$  и  $p_j$  и имеют такую зависимость:

$$p_{i \pm j} = C_{\pm j} = C_j = C \quad \text{для } j = 1, 2, \dots$$

Если  $X_1, X_2, \dots$  - стохастический процесс, начавшийся в момент времени 0, вполне вероятно, что такой процесс *не* является ковариационно стационарным. Однако в *некоторых* имитационных моделях процесс  $X_{k+1}, X_{k+2}, \dots$  будет приблизительно ковариационно стационарным, если  $k$  имеет достаточно большое значение;  $k$  это продолжительность *переходного периода* работы системы [6].

#### 2.4. Планирование экспериментов

Часто возникают ситуации, в которых требуется определить, какие из множества параметров и структурных допущений имеют наибольшее влияние на показатели работы или какой набор параметров модели позволяет получить оптимальную характеристику. В таких ситуациях, при которых цель исследования системы посредством моделирования менее структурирована, весьма эффективным оказывается предварительное планирование эксперимента.

В терминологии планирования экспериментов входные переменные и структурные допущения, составляющие модель, называются *факторами*, а выходные показатели работы - *откликами* [6]. Решение о том, какие параметры и структурные допущения считать фиксированными показателями модели, а какие - экспериментальными факторами, зависит скорее от целей исследования, а не от внутреннего вида модели. Кроме того, при имитационных исследованиях часто интерес представляют несколько различных откликов или показателей работы.

Факторы могут быть либо *количественными*, либо *качественными*. Количественные факторы, как правило, предполагают численные значения, тогда как качественные факторы обычно являются структурными допущениями, которые не измеряются количественно. При этом у некоторых факторов различие может быть не ясно.

При проведении имитационных экспериментов различают *управляемые* и *неуправляемые* факторы в зависимости от того, может ли руководство соответствующих реальных систем управлять ими.

Управляемые факторы имитационных экспериментов имеют наибольшее влияние на решения, которые могут быть приняты относительно реализации реальных систем. Тем не менее, неуправляемые факторы тоже представляют интерес при проведении имитационных экспериментов, поскольку может понадобиться оценить, каким образом резкое увеличение интенсивности прибытия заданий (клиентов и т.п.) повлияет на загруженность системы. В математическом моделировании (таким как выполняемое нами имитационное моделирование) доступно управление *всеми факторами*, независимо от их практической управляемости.

При моделировании перед выполнением прогонов модели *планирование экспериментов* позволяет решить, какие именно конфигурации следует создавать, чтобы получить нужную информацию при наименьшем объеме моделирования. Тщательно проработанные эксперименты гораздо более эффективны, чем выполняемая наугад последовательность прогонов, в ходе которых просто не систематически проверяется ряд альтернативных конфигураций, чтобы увидеть, что при них происходит.

Планирование особенно эффективно на ранних этапах экспериментов, когда еще не ясно, какие факторы важны и как они могут влиять на отклики.

Имитационные эксперименты имеют ряд особенностей, благодаря которым выгодно отличаются от обычных физических экспериментов, проводимых в науке, промышленности или сельском хозяйстве и традиционно используемых в качестве примеров в литературе по планированию экспериментов.

При моделировании имеется возможность управлять такими факторами, как интенсивность прибытия клиентов, которые в реальности контролировать нельзя. Таким образом, можно исследовать гораздо больше видов случайностей, чем при проведении физических опытов с системой.

Другой аспект расширения возможностей управления моделирующими экспериментами связан с детерминированным характером генераторов случайных чисел. При моделировании можно контролировать сам источник изменчивости в отличие от физических экспериментов, результат которых зависит от реальных обстоятельств [6].

### **3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

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. Необходимо помнить, что сеть, слишком точно оптимизированная для решений задач текущего момента, может потребовать серьезных переделок в будущем. При этом на модели можно опробовать влияние всплесков широкополосных запросов или реализовать режим коллапса (для Ethernet), что вряд ли можно применить в работающей сети.

В процессе моделирования выясняются следующие параметры:

- предельные пропускные способности различных фрагментов сети и зависимости потерь пакетов от загрузки отдельных станций и внешних каналов;
- время отклика основных серверов в разных режимах, в том числе таких, которые в реальной сети крайне нежелательны;
- влияние установки новых серверов на перераспределение информационных потоков;
- решение оптимизации топологии при возникновении узких мест в сети (размещение серверов, внешних шлюзов, организация опорных каналов и пр.);
- выбор того или иного типа сетевого оборудования (например, 10BaseTX или 100BaseFX) или режима его работы (например, cut-through, store-and-forward для мостов и переключателей и т.д.);
- выбор внутреннего протокола маршрутизации и его параметров (например, метрики);
- определение предельно допустимого числа пользователей того или иного сервера;
- оценка влияния мультимедийного трафика на работу локальной сети, например, при подготовке видеоконференций.

Результаты моделирования должны иметь точность 10-15 % (см. п. 1.1 гл. 1), т.к. этого достаточно для большинства целей и не требует слишком большого количества машинного времени. Для моделирования поведения реальной сети необходимо знать все ее рабочие параметры. Чем точнее будет воспроизведено поведение сети, тем больше машинного времени это потребует. Кроме того, необходимо сделать некоторые предположения относительно распределения загрузки для конкретных ЭВМ и других сетевых элементов, задержек в переключателях, мостах, времени обработки запросов в серверах. Здесь нужно учитывать и характер решаемых на ЭВМ задач.

В зависимости от целей и задач моделирования сетей выделяют моделирование аналитическое и имитационное.

#### **3.1. Аналитическое моделирование**

Использование аналитических методов связано с необходимостью построения математических моделей локальных вычислительных сетей (ЛВС) в строгих математических терминах. Аналитические модели вычислительных сетей носят обычно вероятностный характер и строятся на основе понятий аппарата теорий массового обслуживания, вероятностей и марковских процессов, а также методов диффузной аппроксимации. Могут также применяться дифференциальные и алгебраические уравнения [12].

При использовании этого математического аппарата часто удается быстро получить аналитические модели для решения достаточно широкого круга задач исследования ЛВС. В то же время аналитические модели имеют ряд существенных недостатков, к числу которых следует отнести:

- значительные упрощения, свойственные большинству аналитических моделей (представление потоков заявок как простейших; предположение об экспоненциальном распределении длительностей обслуживания заявок; невозможность обслуживания заявок одновременно несколькими приборами, например процессором и оперативной памятью, и др.). Подобные упрощения, а зачастую искусственное приспособление аналитических моделей с целью использования хорошо разработанного математического аппарата для исследования реальных ЛВС, ставят иногда под сомнение результаты аналитического моделирования [19];

- громоздкость вычислений для сложных моделей, например использование для представления в модели процесса функционирования современной ЛВС по методу дифференциальных уравнений Колмогорова требует (для установившегося режима) решения сложной системы алгебраических уравнений [19];

- сложность аналитического описания вычислительных процессов ЛВС. Большинство известных аналитических моделей можно рассматривать лишь как попытку подхода к описанию процессов функционирования ЛВС;

- недостаточная развитость аналитического аппарата в ряде случаев не позволяет в аналитических моделях выбирать для исследования наиболее важные характеристики (показатели эффективности) ЛВС. Особенно большие затруднения при аналитическом моделировании связаны с учетом в процессах функционирования ЛВС программных средств операционных систем и другого общего ПО [19].

Указанные особенности позволяют заключить, что аналитические методы имеют самостоятельное значение лишь при исследовании процессов функционирования ЛВС в первом приближении и в частных, достаточно специфичных задачах. В этих случаях возможности исследования аналитических моделей ЛВС существенно расширяют приближенные методы, например: методы диффузионной аппроксимации, методы операционного анализа и аналитические сетевые модели.

### **3.1.1. Аналитическое моделирование на основе систем массового обслуживания**

При аналитическом моделировании исследование процессов или объектов заменяется построением их математических моделей и исследованием этих моделей. В основу метода положены идентичность формы уравнений и однозначность соотношений между переменными в уравнениях, описывающих оригинал и модель. Поскольку события, происходящие в локальных вычислительных сетях, носят случайный характер, то для их изучения наиболее подходящими являются вероятностные математические модели теории массового обслуживания [5].

Аналитическая модель сети представляет собой совокупность математических соотношений, связывающих между собой входные и выходные характеристики сети. При выводе таких соотношений приходится пренебрегать какими-то малозначительными деталями или обстоятельствами [8].

Телекоммуникационная сеть при некотором упрощении может быть представлена в виде совокупности процессоров (узлов), соединенных каналами связи. Сообщение, пришедшее в узел, ждет некоторое время до того, как оно будет обработано. При этом может образоваться очередь таких сообщений, ожидающих обработки. Время передачи или полное время задержки сообщения  $D$  равно:

$$D = T_p + S + W, \quad (3.1)$$

где  $T_p$ ,  $S$  и  $W$ , соответственно, время распространения, время обслуживания и время ожидания. Одной из задач аналитического моделирования является определение среднего значения  $D$ . При больших нагрузках основной вклад дает ожидание обслуживания  $W$ . Для описания очередей в дальнейшем будет использована нотация Д. Дж. Кенделла:

$A/B/C/K/m/z$ ,

где  $A$  - процесс прибытия;

$B$  - процесс обслуживания;

$C$  - число серверов (узлов);

$K$  - максимальный размер очереди (по умолчанию -  $\infty$ );

$m$  - число клиентов (по умолчанию -  $\infty$ );

$z$  - схема работы буфера (по умолчанию FIFO).

Буквы  $A$  и  $B$  представляют процессы прихода и обслуживания и обычно заменяются следующими буквами, характеризующими закон, соответствующий распределению событий:

$D$  - постоянная вероятность;

$M$  - марковское экспоненциальное распределение;

$G$  - обобщенный закон распределения;

$E_k$  - распределение Эрланга порядка  $k$ ;

$H_k$  - гиперэкспоненциальное распределение порядка  $k$  [4].

Наиболее распространенными схемами работы буферов являются FIFO (First-In-First-Out), LIFO (Last-In-First-Out) и FIRO (First-In-Random-Out). Например, запись  $M / M / 2$  означает очередь, для которой времена прихода и обслуживания имеют экспоненциальное распределение, имеется два сервера, длина очереди и число клиентов могут быть сколь угодно большими, а буфер работает по схеме FIFO [19].

Для моделирования ЛВС наиболее часто используются следующие типы СМО:

1. Одноканальные СМО с ожиданием. Представляют собой один обслуживающий прибор с бесконечной очередью. Данная СМО является наиболее распространенной при моделировании. С той или иной долей приближения с ее помощью можно моделировать практически любой узел ЛВС.

2. Одноканальные СМО с потерями. Представляют собой один обслуживающий прибор с конечным числом мест в очереди. Если число заявок превышает число мест в очереди, то лишние заявки теряются. Этот тип СМО может быть использован при моделировании каналов передачи в ЛВС.

3. Многоканальные СМО с ожиданием. Представляют собой несколько параллельно работающих обслуживающих приборов с общей бесконечной очередью. Данный тип СМО часто используется при моделировании групп абонентских терминалов ЛВС, работающих в диалоговом режиме.

4. Многоканальные СМО с потерями. Представляют собой несколько параллельно работающих обслуживающих приборов с общей очередью, число мест в которой ограничено. Эти СМО, как и одноканальные с потерями, часто используются для моделирования каналов связи в ЛВС.

5. Одноканальные СМО с групповым поступлением заявок. Представляют собой один обслуживающий прибор с бесконечной очередью. Перед обслуживанием заявки группируются в пакеты по определенному правилу.

6. Одноканальные СМО с групповым обслуживанием заявок. Представляют собой один обслуживающий прибор с бесконечной очередью.

Заявки обслуживаются пакетами, составляемыми по определенному правилу. Последние два типа СМО могут использоваться для моделирования таких узлов ЛВС, как центры (узлы) коммутации.

Локальная вычислительная сеть в целом может быть представлена в виде сети массового обслуживания. Различают **открытые, замкнутые и смешанные** сети.

**Открытой** называется сеть массового обслуживания, состоящая из  $M$  узлов, причем хотя бы в один из узлов сети поступает извне входящий поток заявок, и имеется сток заявок из сети. Для открытых сетей характерно то, что интенсивность поступления заявок в сеть не зависит от состояния сети, т.е. от числа заявок, уже поступивших в сеть. Открытые сети используются для моделирования ЛВС, работающих в неоперативном режиме. Каждая заявка поступает на вход соответствующего узла коммутации, где определяется место ее обработки. Затем заявка передается на «свой» сервер или по каналу связи – на «соседний» сервер, где обрабатывается, после чего возвращается к источнику и покидает сеть [19].

**Замкнутой** называется сеть массового обслуживания с множеством узлов  $M$  без источника и стока, в которой циркулирует постоянное число заявок. Замкнутые СМО используются для моделирования таких ЛВС, источниками информации для которых служат абонентские терминалы, работающие в диалоговом режиме. В этом случае каждая группа абонентских терминалов представляется в виде многоканальной системы массового обслуживания с ожиданием и включается в состав устройств сети [19].

Различают **простой** и **сложный** режимы работы диалоговых абонентов. В простом режиме абоненты не производят никаких действий, кроме посылки заданий в ЛВС и обдумывания полученного ответа [19].

Абоненты с терминалов посылают запросы, которые по каналам связи поступают на узлы коммутации, а оттуда – на обработку на «свой» или «соседний» сервер. Дальнейшая обработка осуществляется так же, как в открытой сети [14].

При сложном режиме диалога работа абонентов представляется в виде совокупности операций некоего процесса, называемого технологическим процессом. Каждая операция технологического процесса моделируется соответствующей СМО. Часть операций

предусматривает обращение к ЛВС, а часть операций может такого обращения не предусматривать [19].

Алгоритм работы самой ЛВС такой же, как для замкнутой сети.

Смешанной называется сеть массового обслуживания, в которой циркулирует несколько различных типов заявок (трафика), причем относительно одних типов заявок сеть замкнута, а относительно других типов заявок сеть открыта. С помощью смешанных СМО моделируются такие ЛВС, часть абонентов, которых работает в диалоговом, а часть – в неоперативном режиме. Для диалоговых абонентов также различают простой и сложный режим работы. Часто смешанные СМО моделируют ЛВС, в которых сервер дополнительно загружается задачами, решаемыми на фоне работы самой сети [19].

Алгоритм работы сети для диалоговых абонентов аналогичен алгоритму работы замкнутой сети, а алгоритм работы сети для неоперативных абонентов – алгоритму работы открытой сети.

Различают экспоненциальные и неэкспоненциальные модели ЛВС.

**Экспоненциальные модели** основаны на предположении о том, что потоки заявок, поступающие в ЛВС, являются пуассоновскими, а время обслуживания в узлах ЛВС имеет экспоненциальное распределение.

Для таких сетей получены точные методы для определения их характеристик; трудоемкость получения решения зависит в основном от размерности сети [19].

Однако в большинстве сетей (и локальных сетей в частности) потоки не являются пуассоновскими. Модели таких сетей называются **неэкспоненциальными**. При анализе неэкспоненциальных сетей в общем случае отсутствуют точные решения, поэтому наибольшее применение здесь находят приближенные методы.

Одним из таких методов является **метод диффузионной аппроксимации**. Использование диффузионной аппроксимации позволило, к настоящему времени получить приближенные аналитические зависимости для определения характеристик всех типов СМО, рассмотренных выше.

При этом не требуется точного знания функций распределения случайных величин, связанных с данной СМО (интервалов между поступлениями заявок временем обслуживания в приборах), а достаточно только знание первого (математического ожидания) и второго (дисперсии или квадрата коэффициента вариации - ККВ) моментов этих величин [19].

Применение диффузионной аппроксимации при анализе ЛВС основано на следующем:

- по каждому типу заявок вычисляется интенсивность поступления заявок данного типа в узлы сети так, как если бы данный поток заявок циркулировал в сети только один;
- по определенному правилу, зависящему от типа СМО и дисциплины обслуживания, складываются потоки заявок от всех источников;
- по определенному правилу определяется среднее время обслуживания в каждом узле ЛВС;
- полученные значения подставляются в соответствующую диффузионную формулу и определяются характеристики узлов ЛВС;
- определяются характеристики ЛВС в целом.

Постановка задачи анализа ЛВС при этом примет следующий вид. Дано:

- число узлов ЛВС;
- тип каждого узла ЛВС (тип СМО, моделирующей данный узел);
- дисциплина обслуживания в каждом узле ЛВС;
- общее число типов источников заявок, работающих в диалоговом режиме;
- общее число типов источников заявок, работающих в неоперативном режиме;
- для диалоговых источников в случае сложного режима работы число технологических процессов каждого типа, число операций в каждом технологическом процессе, среднее и ККВ времени выполнения каждой операции, матрица вероятностей передач между операциями, а также наличие или отсутствие на каждой операции обращения к ЛВС;
- для диалоговых источников в случае простого режима работы число источников (терминалов) каждого типа, среднее и ККВ времени реакции абонента на ответ сети;

- для неоперативных абонентов - средняя интенсивность поступления заявок и ККВ времени между поступлениями заявок; по каждому типу заявок (диалоговому и неоперативному) средняя интенсивность обслуживания в каждом узле ЛВС, ККВ времени обслуживания в узлах ЛВС и матрица вероятностей передач между узлами.

Требуется найти:

- среднее значение и дисперсию (или стандартное отклонение) времени задержки заявки каждого типа в ЛВС в целом;
- среднее значение и дисперсию (или стандартное отклонение) времени задержки в узлах ЛВС;
- загрузку узлов ЛВС;
- вероятность потери заявки в узле ЛВС (для узлов, моделируемых СМО с потерями).

Ограничения могут быть следующими:

- загрузка узлов не должна превышать 1;
- вероятность потери заявки не должна превышать 1;
- все характеристики должны быть положительны.

Иногда представляет интерес определение такого показателя, как максимальное время задержки заявки каждого типа в ЛВС. Максимальное время это такое время, превышение которого допустимо лишь для некоторого, наперед заданного процента заявок каждого типа. Для определения максимального времени используется методика, основанная на аппроксимации функции распределения времени задержки в сети эр-ланговским или гиперэкспоненциальным распределением, при этом необходимо задавать долю (процент) заявок, для которых рассчитывается максимальное время.

### 3.1.2. Сети Петри

Часто аналитики в задачах моделирования и анализа сложных параллельных и асинхронных систем обращаются к формальным системам, основанным на использовании математического аппарата сетей Петри. Формальная часть теории сетей Петри, основанная в начале 60-х годов немецким математиком Карлом Петри, в настоящее время содержит большое количество моделей, методов и средств анализа, имеющих обширное количество приложений практически во всех отраслях вычислительной техники [14].

Прикладная теория сетей Петри связана главным образом с применением сетей Петри к моделированию систем, их анализу и получающимся в результате этого глубоким проникновением в моделируемые системы [14].

Моделирование в сетях Петри осуществляется на событийном уровне. Определяются, какие действия происходят в системе, какие состояние предшествовали этим действиям и какие состояния примет система после выполнения действия. Выполнение событийной модели в сетях Петри описывает поведение системы. Анализ результатов выполнения может сказать о том, в каких состояниях пребывала или не пребывала система, какие состояния в принципе не достижимы. Однако такой анализ не дает числовых характеристик, определяющих состояние системы. Развитие теории сетей Петри привело к появлению так называемых «цветных» или «раскрашенных» сетей Петри. Понятие цветности в них тесно связано с понятиями переменных, типов данных, условий и других конструкций, более приближенных к языкам программирования.

Таким образом, структура сети Петри задается ориентированным двудольным мультиграфом, в котором одно множество вершин состоит из позиций, а другое множество - из переходов [14], причем множество вершин этого графа разбивается на два подмножества и не существует дуги, соединяющей две вершины из одного подмножества.

Итак, сеть Петри - это набор

$$N = (T, P, A), T \cap P = \emptyset, \quad (3.14)$$

где  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  - подмножество вершин, называемых переходами;

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  - подмножество вершин, называемых позициями (местами);

$A \subset (T \times P) \cup (P \times T)$  - множество ориентированных дуг.

В сетях Петри вводятся объекты двух типов: динамические - изображаются метками (маркерами) внутри позиций и статические - им соответствуют вершины сети Петри.

Распределение маркеров по позициям называют маркировкой. Маркеры могут перемещаться в сети. Каждое изменение маркировки называют событием, причем каждое событие связано с определенным переходом. Считается, что события происходят мгновенно и одновременно при выполнении некоторых условий.

Каждому условию в сети Петри соответствует определенная позиция. Совершению события соответствует срабатывание (возбуждение или запуск) перехода, при котором маркеры из входных позиций этого перехода перемещаются в выходные позиции. Последовательность событий образует моделируемый процесс. Перемещаемые по сети маркеры часто называют фишками. Основные элементы сети Петри представлены в табл. 3.1.

### Элементы сетей Петри

| Название элемента | Изображение элемента  |
|-------------------|---|
| Позиция (P)       |  |
| Переход (T)       |  |
| Дуга              |  |

Переходы в сети Петри являются событиями, которые изменяют состояния в реальной системе. На рис. 3.1 приведен пример интерпретации сети Петри.

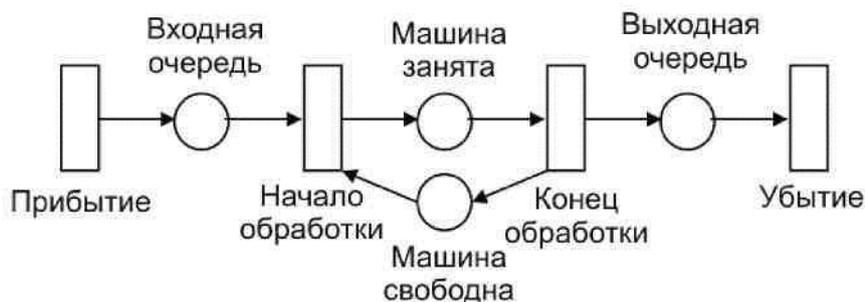


Рис. 3.1. Интерпретация сети Петри

Формальный аппарат сетей Петри предназначен для моделирования систем различного рода и отражает состояния исследуемой системы состоянием сети. Состояние сети Петри определяется ее маркировкой. Количество и распределение фишек сети определяют динамику исследуемой системы. Сеть Петри выполняется посредством запусков переходов в результате удаления фишек из его входных позиций и добавления их в выходные позиции перехода. Последовательность срабатываний переходов полностью определяет поведение сети. Таким образом, сеть Петри описывает структуру системы, ее состояние и поведение [14].

При введении ряда дополнительных правил и условий в алгоритмы моделирования получают различные разновидности сетей Петри. Это необходимо для определения модельного времени, которое позволит моделировать не только последовательность событий, но и их привязку ко времени. В настоящее время выделяют следующие разновидности сетей Петри:

- временная сеть Петри (переходы обладают весом, определяющим продолжительность срабатывания - задержку);
- стохастическая сеть Петри (задержки являются случайными величинами);
- функциональная сеть Петри (задержки определяются как функции некоторых аргументов, например: количества меток в каких-либо позициях, состояния некоторых переходов);

- цветная (раскрашенная) сеть Петри (метки могут быть различных типов, обозначаемых цветами, тип метки может быть использован как аргумент в функциональных сетях).

Основными свойствами сети Петри являются:

- ограниченность (число меток в любой позиции сети не может превысить некоторого значения  $K$ );
- безопасность (частный случай ограниченности);
- сохраняемость (постоянство загрузки ресурсов);
- достижимость (возможность перехода сети из одного заданного состояния, характеризуемого распределением меток, в другое);
- живость (возможностью срабатывания любого перехода при функционировании моделируемого объекта).

Среди достоинств аппарата сетей Петри можно указать следующие:

- позволяет моделировать асинхронность и недетерминизм параллельных независимых событий (в сети Петри могут одновременно и независимо друг от друга сработать несколько переходов), конфликтные взаимодействия между процессами;
- позволяет использовать единые методологические позиции для описания программного обеспечения, аппаратных средств и информационного обмена между системами;
- предоставляет возможность введения любой степени иерархической детализации описываемых программных и аппаратных подсистем модели;
- имеет большую анализирующую мощьность, которая позволяет формальными средствами доказывать существование или отсутствие определенных состояний сети Петри.

Однако формальная модель сетей Петри, в силу своей универсальности, имеет ряд недостатков, затрудняющих практическое применение для моделирования сложных систем. К основным таким недостаткам можно отнести следующие:

- высокая трудоемкость анализа сетей большой размерности, а реальные бизнес-процессы предприятия моделируются именно сетями большой размерности;
- описательная мощьность сетей Петри недостаточна для содержательного моделирования систем;
- обычные сети Петри не отражают требуемые временные характеристики моделируемой системы;
- фишка сети Петри не представляет собой никакой информации, кроме самого факта ее наличия, поэтому чрезвычайно сложно отразить преобразование информации при срабатывании переходов сети Петри;
- невозможность проведения логических преобразований и, как следствие, невозможность управления продвижением фишек по сети.

Недостатки сетей Петри не позволяют описывать сложные системы и в настоящее время используются для описания простейших операций. Также эти факторы явились причиной разработки подклассов и расширений сетей Петри, в которых вводятся определенные ограничения на структуру сети, что позволяет использовать более простые алгоритмы для ее анализа либо дополнительные элементы формальной системы, призванные увеличить ее описательную мощьность.

Большого внимания заслуживают сети высокого уровня, такие как *раскрашенные сети Петри* (Color Petri Net), являющиеся модификацией сетей Петри и отличающиеся хорошо разработанным математическим аппаратом, широко применяемые для самых разнообразных практических целей. Основной причиной высокой эффективности этих формальных моделей является то, что они без потери возможностей формального анализа позволяют исследователю получить значительно более краткие и удобные описания, чем те, которые могут быть сделаны с помощью сетей низкого уровня. В сетях высокого уровня сложность моделей может быть разделена между структурой сети, надписями и описаниями. Это позволяет осуществлять описание значительно более сложных систем и анализировать процессы преобразования данных с помощью общепринятых математических выражений вместо сложного набора позиций, переходов и дуг. Раскрашенные сети Петри, в отличие от обычных сетей Петри, позволяют описывать структуру системы в виде иерархии диаграмм.

Но у данного аппарата моделирования также не устранен ряд недостатков, которые присущи сетям Петри. К таким недостаткам можно отнести:

- необходимость знания разработчиком специфического языка описания моделей [6];
- отсутствие использования принципов объектно-ориентированного подхода;
- низкую гибкость и трудоемкость описания систем в случае их декомпозиции до уровня некоторых элементарных операций.

Раскрашенные сети Петри до сих пор часто применяются для моделирования сетей.

### **3.2. Имитационное моделирование**

Несмотря на большие достижения математического моделирования, многие реальные ситуации невозможно адекватно представить с помощью соответствующих математических моделей. В одних случаях этому мешает определенная «жесткость» математики как языка описания и представления событий и явлений. Кроме того, даже если есть возможность формализовать рассматриваемую жизненную ситуацию посредством построения математической модели, полученная на ее основе задача оптимизации может быть слишком сложной для современных алгоритмов решения задач этого класса.

Альтернативой математическому моделированию сложных систем может служить **имитационное моделирование (ИМ)**. Этот вид моделирования часто является наилучшим (если не единственным) способом исследования реальных систем.

Термин «*имитационное моделирование*» означает, что мы имеем дело с такими моделями, с помощью которых нельзя заранее вычислить или предсказать поведение системы, а для предсказания поведения системы необходим вычислительный эксперимент (имитация) на математической модели при заданных исходных данных [16].

Различие между математической и имитационной моделями заключается в том, что в последней вместо явного математического описания взаимоотношения между входными и выходными переменными реальная система разбивается на ряд достаточно малых (в функциональном отношении) элементов или модулей. Затем поведение исходной системы имитируется как поведение совокупности этих элементов, определенным образом связанных (путем установления соответствующих взаимосвязей между ними) в единое целое. Вычислительная реализация такой модели начинается с входного элемента, далее проходит по всем элементам, пока не будет достигнут выходной элемент модели.

Имитационные модели принято классифицировать по следующим наиболее распространенным признакам:

- по способу взаимодействия с пользователем;
- способу изменения модельного времени;
- цели эксперимента.

Классификация имитационных моделей схематично показана на рис. 3.2.

По способу взаимодействия с пользователем имитационные модели могут быть *автономными* и *интерактивными*. Автономные модели не требуют вмешательства исследователя после определения режима моделирования и задания исходных данных, взаимодействие пользователя с такими моделями сводится только к вводу исходной информации и управлению началом и окончанием работы моделей. Интерактивные модели предусматривают диалог с пользователем в том или ином режиме в соответствии со сценарием моделирования, позволяющие пользователю приостанавливать сеанс моделирования/изменять значения параметров модели, корректировать перечень регистрируемых данных и т.д.

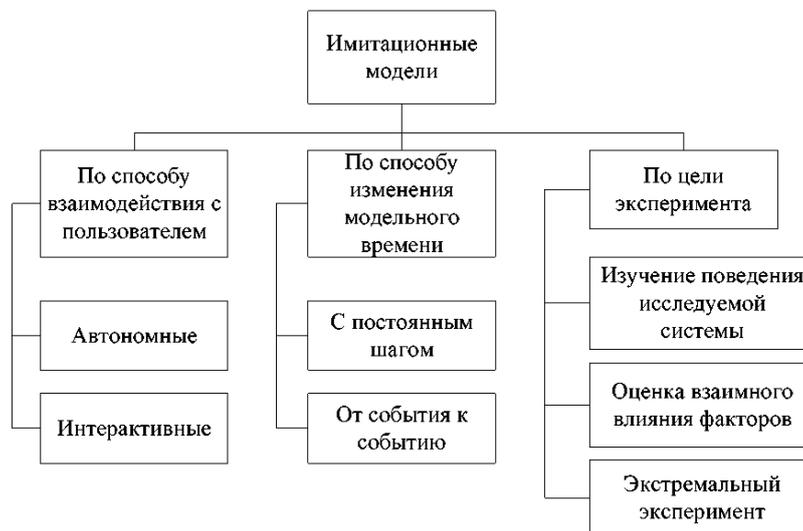


Рис. 3.2. Классификация имитационных моделей

Как было сказано ранее (п. 1.3 гл. 1) существует два механизма изменения модельного времени: *продвижение времени от события к событию* и *продвижение времени с постоянным шагом*.

Процесс построения имитационных моделей представляет собой последовательное выполнение этапов моделирования. Этапы имитационного моделирования, также как и любого другого вида моделирования, обобщены и представлены в п. 1.3. гл. 1 этого учебного пособия.

Названные выше этапы имитационного исследования редко выполняются в строго заданной последовательности, начиная с определения проблемы и заканчивая документированием. В ходе имитационного исследования могут быть сбои в прогонах модели, ошибочные допущения, от которых впоследствии приходится отказываться, т.е. на каждом этапе возможно возвращение назад, к предыдущим этапам. Именно такой итеративный процесс даёт возможность получить модель, которая позволяет принимать решения.

Вычислительные аспекты имитационных моделей обычно сравнительно несложные, но, как правило, очень трудоемкие. Поэтому реализация таких моделей подразумевает использование вычислительной техники.

Имитационные модели значительно гибче в представлении реальных систем, чем их математические «конкуренты». Причина такой гибкости заключается в том, что при имитационном моделировании исходная система рассматривается на элементарном уровне, в то время как математические модели стремятся описать системы на глобальном, как можно более общем уровне.

Но за гибкость имитационных моделей приходится платить высокими требованиями к потребляемым временным и вычислительным ресурсам. Поэтому реализация некоторых имитационных моделей даже на современных быстрых и высокопроизводительных компьютерах может быть очень медленной.

Таким образом, имитационное моделирование является мощным инструментом исследования поведения реальных систем. Методы имитационного моделирования позволяют собрать необходимую информацию о поведении системы путем создания ее компьютеризированной модели. Эта информация используется затем для проектирования системы.

Основное достоинство ИМ:

- возможность описания поведения компонент (элементов) процессов или систем на высоком уровне детализации;
- отсутствие ограничений между параметрами ИМ и состоянием внешней среды;
- возможность исследования динамики взаимодействия компонент во времени и пространстве параметров системы [6].

Эти достоинства обеспечивают имитационному методу широкое распространение.

Рекомендуется использовать *имитационное моделирование* в следующих случаях:

1. Если не существует законченной постановки задачи исследования и идет процесс

познания объекта моделирования. *Имитационная модель* служит средством изучения явления.

2. Если аналитические методы имеются, но математические процессы сложны и трудоемки, *имитационное моделирование* дает более простой способ решения задачи.

3. Когда, кроме оценки влияния параметров (переменных) процесса или системы, желательно осуществить наблюдение за поведением компонент (элементов) процесса или системы в течение определенного периода.

4. Когда *имитационное моделирование* оказывается единственным способом исследования сложной системы из-за невозможности наблюдения явлений в реальных условиях (реакции термоядерного синтеза, исследования космического пространства).

5. Когда необходимо контролировать протекание процессов или поведение систем путем замедления или ускорения явлений в ходе имитации.

6. При подготовке специалистов для новой техники, когда на *имитационных моделях* обеспечивается возможность приобретения навыков в эксплуатации новой техники.

7. Когда изучаются новые ситуации в поведении реальных процессов и систем. В этом случае имитация служит для проверки новых стратегий и правил проведения натуральных экспериментов.

8. Когда особое значение имеет последовательность событий в проектируемых процессах и системах, и модель используется для предсказания узких мест в их функционировании [6].

Однако ИМ наряду с достоинствами имеет и недостатки:

- разработка хорошей ИМ часто обходится дороже создания аналитической модели и требует больших временных затрат;
- может оказаться, что ИМ неточна (что бывает часто), и исследователь не в состоянии измерить степень этой неточности;
- зачастую исследователи обращаются к ИМ, не представляя тех трудностей, с которыми они встретятся и совершают при этом ряд ошибок методологического характера [16].

И тем не менее, ИМ является одним из наиболее широко используемых методов при решении задач синтеза и анализа сложных процессов и систем.

Применительно к вычислительным сетям их имитационные модели воспроизводят: процессы генерации сообщений приложениями; разбиение сообщений на пакеты и кадры определенных протоколов; задержки, связанные с обработкой сообщений, пакетов и кадров внутри операционной системы; процесс получения доступа компьютером к разделяемой сетевой среде; процесс обработки поступающих пакетов маршрутизатором и т.д. При имитационном моделировании сети не требуется приобретать дорогостоящее оборудование – его работы имитируется программами, достаточно точно воспроизводящими все основные особенности и параметры такого оборудования.

Преимуществом имитационных моделей является возможность подмены процесса смены событий в исследуемой системе в реальном масштабе времени на ускоренный процесс смены событий в темпе работы программы. В результате за несколько минут можно воспроизвести работу сети в течение нескольких дней, что дает возможность оценить работу сети в широком диапазоне варьируемых параметров.

Результатом работы имитационной модели являются собранные в ходе наблюдения за протекающими событиями статистические данные о наиболее важных характеристиках сети: временах реакции, коэффициентах использования каналов и узлов, вероятности потерь пакетов и т.п.

#### 4.3. Лабораторные работы

Учебным планом не предусмотрено

#### 4.4. Практические занятия

| <i>№<br/>п/п</i> | <i>Номер<br/>раздела<br/>дисциплины</i> | <i>Наименование практической работы</i>                           | <i>Объем<br/>(час.)</i> | <i>Вид<br/>занятия в<br/>интерактивной,<br/>активной,<br/>инновационной<br/>формах,<br/>(час.)</i> |
|------------------|---|---|-------------------------|--|
| 1                | 2.                                      | Статистическое моделирование псевдослучайных последовательностей. | 9                       | Работа в малых группах (6 часов)   |
| 2                | 3.                                      | Моделирование приемной части цифровой системы связи.              | 5                       | -  |
| 3                | 3.                                      | Моделирование петли символьной синхронизации.                     | 5                       | Работа в малых группах (4 часов)   |
| 4                | 3.                                      | Моделирование передающей части цифровой системы связи.            | 5                       | -  |
| 5                | 3.                                      | Моделирование системы восстановления несущего колебания.          | 5                       | -  |
| 6                | 3.                                      | Моделирование канала связи.                                       | 5                       | -  |
| <b>ИТОГО</b>     |   |   | <b>34</b>               | <b>10</b>  |

#### 4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрено

**5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

| <i>№, наименование разделов дисциплины</i>                       | <i>Компетенции</i> | <i>Компетенции</i> |           | $\Sigma$<br><i>комп.</i> | <i>t<sub>ср</sub>, час</i> | <i>Вид учебных занятий</i> | <i>Оценка результатов</i> |
|--|--------------------|--------------------|-----------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
|  |                    | <i>ОПК</i>         | <i>ПК</i> |                          |                            |                            |                           |
|  |                    | <i>4</i>           | <i>17</i> |                          |                            |                            |                           |
| <b>1</b>   | <b>2</b>           | <b>3</b>           | <b>4</b>  | <b>5</b>                 | <b>6</b>                   | <b>7</b>                   | <b>8</b>                  |
| <b>1.</b> Основы моделирования систем                            | 24                 | +                  | +         | 2                        | 12                         | Лк, СРС                    | ЗАЧЕТ                     |
| <b>2.</b> Основы теории вероятностей и математической статистики | 34                 | +                  | +         | 2                        | 17                         | Лк, ПЗ, СРС                | ЗАЧЕТ                     |
| <b>3.</b> Моделирование компьютерных сетей                       | 50                 | +                  | +         | 2                        | 25                         | Лк, ПЗ, СРС                | ЗАЧЕТ                     |
| <i>всего часов</i>   | <b>108</b>         | <b>54</b>          | <b>54</b> | <b>2</b>                 | <b>54</b>                  |                            |                           |

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Поршневу, С. В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB : учебное пособие / С. В. Поршневу. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2011. - 736 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература).
2. Моделирование систем : учебное пособие / И. А. Елизаров [и др.]. - Старый Оскол : ТНТ, 2015. - 136 с.

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

| №                                | Наименование издания  | Вид занятия | Количество экземпляров в библиотеке, шт. | Обеспеченность, (экз./ чел.) |
|----------------------------------|---|-------------|--|------------------------------|
| 1                                | 2   | 3           | 4  | 5                            |
| <b>Основная литература</b>       |   |             |  |                              |
| 1                                | Советов, Б. Я. Моделирование систем : учебник для бакалавров / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 7-е изд. - М. : Юрайт, 2013. - 343 с. - (Бакалавр. Базовый курс).  | Лк, ПЗ      | 15                                       | 1                            |
| 2                                | Попков, Г. В. Математические основы моделирования сетей связи : учебное пособие / Г. В. Попков, В. К. Попков, В. В. Величко. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 182 с   | Лк, ПЗ      | 10                                       | 0,7                          |
| <b>Дополнительная литература</b> |   |             |  |                              |
| 3                                | Дьяконица, С. А. Моделирование систем [Электронный ресурс] : метод. указания к лабораторным работам / С. А. Дьяконица. - Братск : БрГУ, 2010. - 106 с. - Б. ц.<br>( <a href="http://ecat.brstu.ru/catalog/Учебные%20и%20учебно-методические%20пособия/Информатика%20-%20Вычислительная%20техника%20-%20Программирование/Дьяконица%20С.А.%20Моделирование%20систем.МУ.2010.pdf">http://ecat.brstu.ru/catalog/Учебные%20и%20учебно-методические%20пособия/Информатика%20-%20Вычислительная%20техника%20-%20Программирование/Дьяконица%20С.А.%20Моделирование%20систем.МУ.2010.pdf</a> ) | ПЗ          | Эр                                       | 1                            |
| 4                                | Советов, Б. Я. Моделирование систем. Практикум : учеб. пособие для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 3-е изд., стереотип. - Москва : Высшая школа, 2005. - 295 с.   | Лк, ПЗ      | 25                                       | 1                            |

## 8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ  
[http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r\\_15/cgiirbis\\_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=](http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=).
2. Электронная библиотека БрГУ  
<http://ecat.brstu.ru/catalog>.
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»  
<http://biblioclub.ru>.
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»  
<http://e.lanbook.com>.

5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" <http://window.edu.ru> .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ) <https://uisrussia.msu.ru/> .
8. Национальная электронная библиотека НЭБ <http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/> .

## **9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/практическим работам**

#### **Практическое занятие №1**

#### **Статистическое моделирование псевдослучайных последовательностей**

##### Цель работы:

Приобрести навыки статистического моделирования псевдослучайных последовательностей, познакомиться с получением равномерной распределенной псевдослучайной последовательности, используя метод обратных функций для заданного закона распределения, научиться определять основные статистические характеристики псевдослучайных последовательностей.

##### Задание:

Произвести моделирование псевдослучайной последовательности с помощью Simulink произвести анализ статистических данных.

##### Порядок выполнения:

1. Исходя из заданных данных, сгенерировать равномерную распределенную псевдослучайную последовательность в интервале от 0 до 1 (включая 0 и 1) и найти основные статистические характеристики этой последовательности.
2. Используя метод обратных функций сгенерировать псевдослучайную последовательность заданным законом распределения.
3. Определить выборочные средние и среднеквадратичное отклонение полученной последовательности заданным законом распределения (задание 2).
4. Построить гистограмму псевдослучайной выборки и проверить согласие теоретического и экспериментального закона распределения по критерию  $\chi^2$ .
5. Определить коэффициент корреляции псевдослучайной выборки и найти его доверительные интервалы.

##### Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

##### Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

##### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в втором разделе данной дисциплины.

#### Основная литература

1. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учебник для бакалавров / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 7-е изд. - М. : Юрайт, 2013. - 343 с. - (Бакалавр. Базовый курс).

#### Дополнительная литература

1. Дьяконица, С. А. Моделирование систем [Электронный ресурс] : метод. указания к лабораторным работам / С. А. Дьяконица. - Братск : БрГУ, 2010. - 106 с. - Б. ц.

#### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Конгруэнтные методы моделирования случайных величин.
2. Случайная величина.
3. Статистические критерии.
4. Корреляция.

#### **Практическое занятие №2**

#### **Моделирование приемной части цифровой системы связи**

##### Цель работы:

Изучение основ работы приемников цифровых систем связи.

##### Задание:

Произвести описание теоретических моделей процессов, происходящих в приемниках цифровых систем связи; моделирование системы связи в Simulink.

##### Порядок выполнения:

Создайте модель законченной системы связи в Simulink, убедитесь в ее работоспособности. Установите нулевое частотное и фазовое рассогласование. Задайте нулевую дробную задержку в канале связи. Оцените статистическую вероятность появления ошибки при помощи блока *Error Rate Calculator*. Увеличивайте ОСШ с шагом 5 дБ. Проведите ряд дополнительных измерений (не менее 5 точек) в области низких вероятностей символьной ошибки. Данные занесите в таблицу и постройте график. Проведите моделирование согласно пункту 2 при фазовом рассогласовании 5°, 10°, 85°, 175°. Данные занесите в таблицу и постройте график зависимости символьной ошибки от фазового рассогласования. Проведите моделирование при дробной задержке в канале связи 0.1, 0.5, 1, 3.9. Данные занесите в таблицу и постройте график зависимости символьной ошибки от дробной задержки в канале связи. При необходимости скорректируйте диапазон задержек для конкретного вида манипуляции.

##### Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы
2. Задание
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
4. Вывод.

##### Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

##### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

#### Основная литература

1. Попков, Г. В. Математические основы моделирования сетей связи : учебное пособие / Г. В. Попков, В. К. Попков, В. В. Величко. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 182 с.

#### Дополнительная литература

1. Советов, Б. Я. Моделирование систем. Практикум : учеб. пособие для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 3-е изд., стереотип. - Москва : Высшая школа, 2005. - 295

с.

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Общие вопросы построения приемных систем цифровой связи.
2. Архитектура первого поколения цифровых приемников.
3. Архитектура второго поколения цифровых приемников.
4. Архитектура третьего поколения цифровых приемников.
5. Согласованная фильтрация сигнала.
6. Демодуляция сигнала. Расчет метрик. Мягкое решение. Жесткое решение.

### **Практическое занятие №3**

#### **Моделирование петли символьной синхронизации**

##### Цель работы:

Исследование систем символьной синхронизации приемных устройств цифровой связи.

##### Задание:

Произвести описание теоретических моделей процессов, происходящих в блоках символьной синхронизации цифровых систем связи; моделирование системы цифровой связи с блоком восстановления несущего колебания и блоком символьной синхронизации в Simulink.

##### Порядок выполнения:

Создайте модель системы связи в Simulink с блоком синхронизации по символьной частоте. Установите нулевую дробную задержку в канале связи. При нулевом фазовом и частотном рассогласовании убедитесь в работоспособности модели. Убедитесь в работоспособности петли восстановления и правильной работе петли синхронизации по символьной частоте. Создайте генератор медленно изменяющегося синусоидального сигнала. Подайте сигнал генератора на вход блока переменной дробной задержки в канале связи. Наблюдайте на глазковой диаграмме перемещение сигнала и убедитесь в правильной работе петли синхронизации по символьной частоте. Оцените степень влияния петли синхронизации по символьной частоте на вид принимаемого созвездия. Исключите петлю синхронизации по несущей частоте из модели приемника. Изменяйте значения частотного и фазового рассогласования, оцените возможность работы петли синхронизации по символьной частоте при частотном рассогласовании передатчика и приемника.

##### Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы
2. Задание
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
4. Вывод.

##### Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

##### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

##### Основная литература

1. Попков, Г. В. Математические основы моделирования сетей связи : учебное пособие / Г. В. Попков, В. К. Попков, В. В. Величко. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 182 с.

##### Дополнительная литература

1. Советов, Б. Я. Моделирование систем. Практикум : учеб. пособие для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 3-е изд., стереотип. - Москва : Высшая школа, 2005. - 295 с.

## Контрольные вопросы для самопроверки

1. Системы синхронизации по символьной частоте.
2. Детекторы ошибки синхронизации по символьной частоте.
3. Схемы построения генератора, управляющего фильтром-интерполятором.
4. Фильтры-интерполяторы. Фильтр Фарроу, полифазный фильтр-банк.

### **Практическое занятие №4**

#### **Моделирование передающей части цифровой системы связи**

##### Цель работы:

Изучение принципов формирования сигнала в системах цифровой связи.

##### Задание:

Произвести описание теоретической модели исследуемой системы передачи данных; создание модели передающего устройства цифровой системы связи в Simulink; моделирование работы системы при различных начальных условиях; измерение основных параметров работы передающей системы.

##### Порядок выполнения:

Создайте модель передатчика в Simulink, убедитесь в ее работоспособности. Установите коэффициент скругления формирующего фильтра равным 0 и запустите модель. Сохраните для отчета все графики, полученные в ходе моделирования. Произведите оценку ширины спектра сигнала, крутизны скатов, уровня первого бокового лепестка и занесите эти данные в таблицу. При помощи осциллографа оцените амплитуду квадратурных составляющих для внешних точек сигнального созвездия. Занесите полученные данные в таблицу, найдите отношение максимального значения к минимальному. Повторите задание пункта 2 для коэффициентов скругления фильтра 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 и 1.

##### Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

##### Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

##### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

##### Основная литература

1. Попков, Г. В. Математические основы моделирования сетей связи : учебное пособие / Г. В. Попков, В. К. Попков, В. В. Величко. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 182 с.

##### Дополнительная литература

1. Советов, Б. Я. Моделирование систем. Практикум : учеб. пособие для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 3-е изд., стереотип. - Москва : Высшая школа, 2005. - 295 с.

## Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дискретизация и квантование сигнала.
2. Кодирование источника.

3. Канальное кодирование.
4. Формирователь комплексной огибающей сигнала (модулятор).
5. Квадратурный модулятор.

### **Практическое занятие №5**

#### **Моделирование системы восстановления несущего колебания**

##### Цель работы:

Исследование систем синхронизации приемных устройств цифровой связи.

##### Задание:

Произвести описание теоретических моделей процессов, происходящих в блоках синхронизации цифровых систем связи; моделирование системы цифровой связи с блоком восстановления несущего колебания в Simulink.

##### Порядок выполнения:

Создайте модель системы связи в Simulink с блоком восстановления несущего колебания, убедитесь в ее работоспособности. Установите нулевую дробную задержку в канале связи. При нулевом фазовом и частотном рассогласовании убедитесь в работоспособности модели. Задайте фазовое рассогласование  $40^\circ$  и наблюдайте на блоке отображения сигнального созвездия процесс автоматического регулирования. Устанавливая различное фазовое рассогласование, создайте все возможные случаи ложной синхронизации системы связи. При нулевом фазовом рассогласовании задайте частотный сдвиг сигнала 10 Гц, наблюдайте переходной процесс системы регулирования. Устанавливая различные значения частотного рассогласования, найдите максимальное значение, при котором система автоподстройки частоты работоспособна. Оцените влияние изменения коэффициента пропорциональной части системы автоматического регулирования на длительность переходного процесса и максимальное значение частотного рассогласования. Найдите и зафиксируйте оптимальное значение коэффициента пропорциональной части для максимального частотного рассогласования и для наиболее быстрой работы петли регулирования при частотном рассогласовании 10 Гц. Оцените влияние изменения коэффициента интегральной части системы автоматического регулирования.

##### Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

##### Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

##### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

##### Основная литература

1. Попков, Г. В. Математические основы моделирования сетей связи : учебное пособие / Г. В. Попков, В. К. Попков, В. В. Величко. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 182 с.

##### Дополнительная литература

1. Советов, Б. Я. Моделирование систем. Практикум : учеб. пособие для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 3-е изд., стереотип. - Москва : Высшая школа, 2005. - 295 с.

## Контрольные вопросы для самопроверки

1. Системы восстановления несущего колебания.
2. Петля с возведением сигнала в квадрат (петля Пистолькорса). Син-
3. фазно-квадратурная петля (петля Костаса).
4. Петля символьной синхронизации.
5. Фазовая неоднозначность при приеме сигналов с подавленным несущим колебанием.  
Способы решения фазовой неоднозначности.

### **Практическое занятие №6**

#### **Моделирование канала связи**

##### Цель работы:

Исследование явлений, возникающих в канале связи системы передачи цифровой информации.

##### Задание:

Произвести описание теоретических моделей процессов, происходящих в канале связи; моделирование канала связи в Simulink.

##### Порядок выполнения:

Согласно приведенным выше рисункам и описанию, создайте модель канала связи в Simulink, подключите ее к передатчику и убедитесь в ее работоспособности. Установите нулевое частотное и фазовое рассогласование. Задайте нулевую дробную задержку в канале связи. Проведите моделирование при отношениях сигнал/шум 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 дБ. Оцените значение ОСШ, при котором различие точек в созвездии становится невозможным. Проведите дополнительно 6 измерений возле этого значения. Установите ОСШ в канале равным 100 дБ. Задайте нулевую дробную задержку. Проведите моделирование при фазовом рассогласовании 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 270° и 360°. Проведите моделирование при частотном рассогласовании, равном 10 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 3 кГц. Установите ОСШ в канале равным 100 дБ. Задайте нулевое частотное и фазовое рассогласование. Проведите моделирование при дробной задержке, равной 0.1, 0.5, 1, 2, 3. Сохраните для отчета все графики, полученные в ходе моделирования.

##### Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

##### Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

##### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

##### Основная литература

1. Попков, Г. В. Математические основы моделирования сетей связи : учебное пособие / Г. В. Попков, В. К. Попков, В. В. Величко. - Москва : Горячая линия- Телеком, 2014. - 182 с.

##### Дополнительная литература

1. Советов, Б. Я. Моделирование систем. Практикум : учеб. пособие для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - 3-е изд., стереотип. - Москва : Высшая школа, 2005. - 295 с.

## Контрольные вопросы для самопроверки

1. Затухание сигнала в канале связи.
2. Воздействие АБГШ на сигнал.
3. Частотный и фазовый сдвиг сигнала.
4. Задержка в канале связи (дискретная, дробная, аналоговая).

Многолучевое распространение сигнала.

#### **10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. ОС Windows 7 Professional
2. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level
3. Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security.
4. MATLAB Academic new Product Concurrent Licenses
5. Simulink Academic new Product Concurrent Licenses

#### **11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

| <i>Вид занятия</i> | <i>Наименование аудитории</i> | <i>Перечень основного оборудования</i> | <i>№ Лк или ПЗ</i> |
|--------------------|-------------------------------|--|--------------------|
| <b>1</b>           | <b>2</b>                      | <b>3</b>                               | <b>4</b>           |
| Лк                 | Дисплейные классы             | Персональные компьютеры                | Лк 1-17            |
| ПЗ                 | Дисплейные классы             | Персональные компьютеры                | ПЗ 1-6             |
| СР                 | ЧЗЗ                           | -                                      | -                  |



## 2. Вопросы к зачету

| № п/п | Компетенции |  | ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ  | № и наименование раздела                                   |
|-------|-------------|--|---|--|
|       | Код         | Определение  |   |  |
| 1     | 2           | 3  | 4   | 5  |
| 1     | ОПК-4       | способностью иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ | 1. Модель и моделирование.  | 1. Основы моделирования систем                             |
|       |             |  | 2. Классификация моделей по степени абстрагирования модели от оригинала |  |
|       |             |  | 3. Классификация моделей по отношению ко времени                        |  |
|       |             |  | 4. Случайные величины и их свойства                                     | 2. Основы теории вероятностей и математической статистики. |
|       |             |  | 5. Биноминальный закон распределения                                    |  |
|       |             |  | 6. Равномерный закон распределения                                      |  |
|       |             |  | 7. Геометрическое распределение   |  |
|       |             |  | 8. Выходные данные и стохастические процессы моделирования              | 3. Моделирование компьютерных сетей.                       |
|       |             |  | 9. Аналитическое моделирование  |  |
|       |             |  | 10. Сети Петри  |  |
| 2     | ПК-17       | способностью применять современные теоретические и экспериментальные методы исследования с целью создания новых перспективных средств электросвязи и информатики   | 1. Классификация моделей по степени устойчивости                        | 1. Основы моделирования систем                             |
|       |             |  | 2. Классификация моделей по отношению к внешним факторам                |  |
|       |             |  | 3. Нормальное распределение   | 2. Основы теории вероятностей и математической статистики. |
|       |             |  | 4. Закон распределения Пуассона   |  |
|       |             |  | 5. Экспоненциальный закон распределения                                 |  |
|       |             |  | 6. Треугольное распределение (распределение Симпсона)                   |  |
|       |             |  | 7. Планирование экспериментов   | 3. Моделирование компьютерных сетей.                       |
|       |             |  | 8. Аналитическое моделирование на основе систем массового обслуживания  |  |
|       |             |  | 9. Имитационное моделирование   |  |

#### 4. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

| Показатели  | Оценка                   | Критерии   |
|---|--------------------------|--|
| <p><b>Знать</b><br/>(ОПК-4):<br/>- базовое устройство персонального компьютера. Основные информационные процессы, происходящие в персональном компьютере;</p> <p>(ПК-17):<br/>- принципы проектирования математических моделей и связи их элементов;</p> <p><b>Уметь</b><br/>(ОПК-4):<br/>- использовать персональный компьютер для самостоятельной работы;</p> <p>(ПК-17):<br/>- собирать и анализировать информацию для формирования исходных данных для проектирования моделей;</p> <p><b>Владеть</b><br/>(ОПК-4):<br/>- достаточным уровнем использования универсальных пакетов прикладных компьютерных программ;</p> <p>(ПК-17):<br/>- достаточным уровнем использования универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.</p> | <p><b>зачтено</b></p>    | <p>Студент должен во время ответа показать знания: различных моделей, методов моделирования, основных терминов используемые в научно-технической литературе по моделированию сетей связи. Студент должен иметь навыки владения: использования универсальных программных продуктов на ПК, понимания материала и способности высказывания мыслей на научно-техническом языке. Студент во время ответа должен продемонстрировать умения: использования навыков анализа основных понятий в теории моделирования сетей связи.</p> |
|   | <p><b>не зачтено</b></p> | <p>На поставленные вопросы студент не ответил. На дополнительные вопросы преподавателя также не может ответить.</p>  |

#### 4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина моделирование сетей связи направлена на ознакомление с математическими моделями, и их практическим применением в современных сетях связи; на получение теоретических знаний и практических навыков использования различных методов моделирования, и их дальнейшего использования в практической деятельности.

Изучение дисциплины моделирование систем управления предусматривает:

- лекции,

- практические занятия,
- самостоятельную работу студента,
- зачёт.

В ходе освоения раздела 1 «Основы моделирования систем» студенты должны изучить: основные понятия и определения дисциплины и способы их применения, классификацию моделей.

В ходе освоения раздела 2 «Основы теории вероятностей и математической статистики» студенты должны изучить: различные виды распределения случайных величин, их основные свойства, научиться планировать эксперименты и знать его основные этапы.

В ходе освоения раздела 3 «Моделирование компьютерных сетей» студенты должны изучить: методы аналитического и имитационного моделирование сетей связи.

В процессе проведения практических работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков реализации представления о работе с математическими моделями систем управления и использования программы Matlab и пакета Simulink .

При подготовке к зачёту рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам: аналитическое и имитационное моделирование, законы распределения случайной величины, критерии адекватности и устойчивости математических моделей.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературой. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и Интернете.

**АННОТАЦИЯ**  
**рабочей программы дисциплины**  
**Моделирование сетей связи**

**1. Цель и задачи дисциплины**

Целью изучения дисциплины является: формирование у студентов знаний и навыков по использованию основ математического моделирования, необходимых при проектировании, исследовании и эксплуатации сетей связи.

Задачей изучения дисциплины является: освоение основных принципов и методов построения математических моделей сетей, формирование навыков проведения вычислительных экспериментов.

**2. Структура дисциплины**

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк – 17 часов, ПЗ – 34 часов, СРС – 57 часов.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 108 часов, 3 зачетных единицы.

2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Основы моделирования систем.
2. Основы теории вероятностей и математической статистики.
3. Моделирование компьютерных сетей.

**3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующей компетенции:

ОПК-4 - способностью иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ;

ПК-17 - способностью применять современные теоретические и экспериментальные методы исследования с целью создания новых перспективных средств электросвязи и информатики.

**4. Вид промежуточной аттестации: зачёт**

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе  
на 20\_\_-20\_\_ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.,  
*(разработчик)*

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
*(подпись)*

\_\_\_\_\_  
*(Ф.И.О.)*

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО  
КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

| № компетенции | Элемент компетенции  | Раздел   | Тема  | ФОС                             |
|---------------|--|--|---|---------------------------------|
| ОПК-4         | способностью иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ | 2. Основы теории вероятностей и математической статистики. | Выходные данные и стохастические процессы моделирования | Отчет по практическому занятию. |
|               |  | 3. Моделирование компьютерных сетей.                       | Аналитическое моделирование                             | Отчет по практическому занятию. |
| ПК-17         | способностью применять современные теоретические и экспериментальные методы исследования с целью создания новых перспективных средств электросвязи и информатики   | 2. Основы теории вероятностей и математической статистики. | Выходные данные и стохастические процессы моделирования | Отчет по практическому занятию. |
|               |  | 3. Моделирование компьютерных сетей.                       | Аналитическое моделирование                             | Отчет по практическому занятию. |
|               |  |  | Имитационное моделирование                              | Отчет по практическому занятию. |

## 2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

| Показатели   | Оценка            | Критерии   |
|--|-------------------|--|
| <p><b>Знать</b><br/>(ОПК-4):<br/>- базовое устройство персонального компьютера. Основные информационные процессы, происходящие в персональном компьютере;</p> <p>(ПК-17):<br/>- принципы проектирования математических моделей и связи их элементов;</p> <p><b>Уметь</b><br/>(ОПК-4):<br/>- использовать персональный компьютер для самостоятельной работы;</p> <p>(ПК-17):<br/>- собирать и анализировать информацию для формирования исходных данных для проектирования моделей;</p> | <b>зачтено</b>    | Во время защиты практических работ студент ответил на поставленные преподавателем вопросы.   |
| <p><b>Владеть</b><br/>(ОПК-4):<br/>- достаточным уровнем использования универсальных пакетов прикладных компьютерных программ;</p> <p>(ПК-17):<br/>- достаточным уровнем использования универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.</p>   | <b>не зачтено</b> | Во время защиты практических работ студент не смог дать ответы на поставленные преподавателем вопросы. Либо отчет имеет ряд замечаний. |

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки

11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи. Профиль Многоканальные телекоммуникационные системы от «б» марта 2015 г. №174

для набора 2015 года и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «13» июля 2015 г. № 475

для набора 2016 года и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» июня 2016 г. № 429

для набора 2017 года и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» марта 2017 г. № 125

для набора 2018 года и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018 г. № 130

**Программу составил (и):**

Седельников И.А. доцент кафедры УТС

*Ф.И.О., должность, ученое звание, (степень)*

\_\_\_\_\_ (подпись)

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры УТС

от «28» декабря 2018 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ И.В. Игнатьев

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий выпускающей кафедрой \_\_\_\_\_ И.В. Игнатьев

Директор библиотеки \_\_\_\_\_ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией факультета ЭиА

от «28» декабря 2018 г., протокол № 5

Председатель методической комиссии факультета \_\_\_\_\_

СОГЛАСОВАНО:

Начальник  
учебно-методического управления \_\_\_\_\_ Г.П. Нежевец

Регистрационный № \_\_\_\_\_