

Министерство образования и науки  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ГОУВПО «АмГУ»)

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ИиУС  
\_\_\_\_\_ А.В.Бушманов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2009г.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ**

Применение методов моделирования в исследованиях и проектировании

для магистров направления  
23010068 – «Информатика и вычислительная техника» по  
магистерской программе «Компьютерное моделирование»

Составитель: А.В.Бушманов

2009

*Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
факультета математики  
и информатики  
Амурского государственного  
университета*

Применение методов моделирования в исследованиях и проектировании для магистров направления 23010068 – «Информатика и вычислительная техника» магистерской программы «Компьютерное моделирование»: учебно-методический комплекс дисциплины. /Бушманов А.В. – Благовещенск. Изд-во Амурского гос. ун-та, 2009г.

□ Амурский государственный университет, 2009.

□ Кафедра Информационных и управляющих систем, 2009.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Выписка из государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования .....	4
2. Рабочая программа .....	5
3. График самостоятельной работы магистрантов .....	13
4. Методические рекомендации по проведению самостоятельной работы магистрантов .....	13
5. Перечень учебников, учебных пособий .....	13
6. Краткий конспект лекций .....	14
7. Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ .....	52
8. Перечень программных продуктов.....	69
9. Методические указания по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний магистров.....	70
10. Карта кадровой обеспеченности дисциплины .....	70

# 1. ВЫПИСКА ИЗ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО СТАНДАРТА ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Направление подготовки магистранта  
23010068 – Информатика и вычислительная техника

Магистерская программа

Компьютерное моделирование

Квалификация – *магистр*.

Цель курса «Применение методов моделирования в исследованиях и проектировании» - дать магистранту и соискателю в области технических наук широкую панораму методических принципов и подходов к моделированию в научных исследованиях и проектировании. На всех этапах развития науки решающую роль играл метод, то есть стратегия подходов, умозрительных принципов, пути построения каркаса, решетки научного знания с целью последующего выполнения его архитектуры и возведения самого здания науки. Программа учитывает определенную предварительную базу знаний, полученную магистрантом в курсах бакалавра.

Успешное изучение содержания курса по предлагаемой рабочей программе способствует формированию методологической и научной культуры, гибкому восприятию научных текстов, участию в дискуссиях по методологии, эффективному применению полученных знаний в научно-исследовательской работе.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине: Применение методов моделирования в исследованиях и проектировании

Для направления 23010068 – «Информатика и вычислительная техника»  
магистерской программы «Компьютерное моделирование»

Факультет: Математики и информатики

Кафедра: Информационных и управляющих систем

Курс шестой

Семестр: 11

Учебный план набора 2009 года и последующих лет

Распределение учебного времени

Лекции	17 час.
Лабораторные занятия	17 час.
Практические занятия	17 час.
Всего ауд. занятий	51 час.
Самостоятельная работа	99 час.
Общая трудоемкость	150 час.

Зачет 11 семестр

### 1. Цель и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

#### 1.1. Цель преподавания дисциплины

Целью данной дисциплины является применение моделирования в исследованиях и проектировании, позволяющих при проведении научных исследований использовать известные методы и модели.

После изучения данной дисциплины магистрант должен знать принципы построения методик моделирования, уметь ими пользоваться, а также широко использовать информационные и вычислительные ресурсы. Изучить особенности методов моделирования. Иметь представление, о возможностях решения научных задач применяя определенную методику. Уметь применять для решения своих задач методы математического и имитационного моделирования. Кроме того, должен освоить основные понятия и положения по системам искусственного интеллекта.

## 1.2. Задачи изучения дисциплины

Изучая курс «Применение методов моделирования в исследованиях и проектировании», магистранты должны научиться разрабатывать математические модели процессов и объектов, методы их исследования, выполнять их сравнительный анализ, владеть способами формализации интеллектуальных задач.

По окончании изучения курса магистранты должны планировать, организовывать и проводить научные исследования, использовать типовые программные продукты, ориентированные на решение научных, проектных и технологических задач.

## 1.3. Перечень разделов (тем) необходимых дисциплин

1.3.1. Информатика: Количество и качество информации. Единицы измерения информации. Информация и энтропия. Сообщения и сигналы. Кодирование и квантование сигналов. Информационный процесс в автоматизированных системах. Фазы информационного цикла и их модели. Информационный ресурс и его составляющие. Информационные технологии. Технические и программные средства информационных технологий. Основные виды обработки данных.

1.3.2. Электротехника и электроника: Основы электроники и электрические измерения. Элементная база современных электронных устройств. Источники вторичного электропитания. Усилители электрических сигналов. Импульсные и автогенераторные устройства. Основы цифровой электроники. Микропроцессорные средства. Электрические измерения и приборы.

1.3.3. Метрология, стандартизация и сертификация: Основные положения государственной системы стандартизации ГОС. Научная база стандартизации. Определение оптимального уровня унификации и стандартизации. Государственный контроль и надзор за соблюдением требований государственных стандартов. Основные цели и объекты сертификации. Термины и определения в области сертификации.

1.3.4. Безопасность жизнедеятельности: Безопасность функционирования автоматизированных и роботизированных производств. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Управление безопасностью жизнедеятельности. Правовые и нормативно-технические основы управления. Системы контроля требований безопасности и экологичности.

1.3.5. Алгоритмические языки и программирование: Основные этапы решения задач на ЭВМ; критерии качества программы; диалоговые программы; дружественность, жизненный цикл программы; постановка задачи и спецификация программы; способы записи алгоритма; программа на языке высокого уровня; стандартные типы данных; представление основных структур программирования: итерация, ветвление, повторение; процедуры; типы данных, определяемые пользователем; записи; файлы; динамические структуры данных.

1.3.6. Основы теории управления: общие принципы системной организации; устойчивость, управляемость и наблюдаемость; инвариантность и чувствительность систем управления; математические модели объектов и систем управления; формы представления моделей; методы анализа и синтеза систем управления; цифровые системы управления; использование микропроцессоров и микро-ЭВМ в системах управления; особенности математического описания цифровых систем управления, анализа и синтеза систем управления с ЭВМ в качестве управляющего устройства; программная реализация алгоритмов управления в цифровых системах.

1.3.7. Операционные системы: Назначение и функции операционных систем. Мультипрограммирование. Режим разделения времени. Многопользовательский режим работы. Режим работы и ОС реального времени. Универсальные операционные системы и ОС специального назначения. Классификация операционных систем.

1.3.8. Базы данных: Назначение и основные компоненты системы баз данных; обзор современных систем управления базами данных (СУБД); уровни представления баз данных; понятия схемы и подсхемы; модели данных; иерархическая, сетевая и реляционная модели данных; схема отношения; язык манипулирования данными для реляционной модели; реляционная алгебра и язык SQL; проектирование реляционной базы данных.

1.3.9. Сети ЭВМ и телекоммуникации: Классификация информационно-вычислительных сетей. Способы коммутации. Сети одноранговые и "клиент/сервер". Уровни и протоколы. Эталонная модель взаимосвязи открытых систем. Аналоговые каналы передачи данных. Способы модуляции. Модемы. Цифровые каналы передачи данных. Разделение каналов по времени и частоте. Характеристики проводных линий связи. Спутниковые каналы. Сотовые системы связи. Кодирование информации. Количество информации и энтропия. Самосинхронизирующиеся коды. Способы контроля правильности передачи информации. Алгоритмы сжатия данных. Локальные вычислительные сети. Методы доступа. Множественный доступ с контролем несущей и

обнаружением конфликтов. Разновидности сетей Ethernet. Маркерные методы доступа. Сети Token Ring и FDDI. Высокоскоростные локальные сети. Организация корпоративных сетей. Функции сетевого и транспортного уровней. Алгоритмы маршрутизации. Протоколы TCP/IP. Протоколы управления. Адресация в Internet. Особенности технологий Frame Relay, ATM, SDH.

1.3.10. Методы и средства защиты информации: Политика безопасности. Стандарты безопасности. Криптографические модели. Алгоритмы шифрования. Алгоритмы аутентификации пользователей. Многоуровневая защита корпоративных сетей. Защита информации в сетях. Требования к системам защиты информации.

1.3.11. Организация и планирование производства: Подготовка и организация высокотехнологичного производства; организация вспомогательных цехов и служб предприятия; стратегическое и оперативное планирование производства; методы управления производством и информационное обеспечение; методы разработки и принятия управленческих решений; методы управления персоналом, рациональная организация труда; мотивация, профессиональная адаптация и деловая карьера на предприятии.

1.3.12. Теоретические основы автоматизированного управления: Понятие автоматизированного и автоматического управления; модели и процесс принятия решения; автоматизированные системы управления производством, научным экспериментом, обучением, технологическим процессом; категориальные понятия системного подхода; организационная и функциональная структура систем; методика и примеры формализации систем.

1.3.13. Теория принятия решений: Понятия исследования операций и системного анализа; методологические основы теории принятия решений; задачи выбора решений, отношения, функции выбора, функции полезности, критерии; детерминированные стохастические задачи, задачи в условиях неопределенности; задачи скалярной оптимизации, линейные, нелинейные, дискретные; многокритериальные задачи.

1.3.14. Моделирование систем: Классификация видов моделирования; имитационные модели систем; математические схемы моделирования систем; планирование имитационных экспериментов с моделями систем; формализация и алгоритмизация процессов функционирования систем; концептуальные модели систем; принципы построения моделирующих алгоритмов; статистическое моделирование систем на ЭВМ.

1.3.15. Информационные технологии: Общая классификация видов информационных технологий и их реализация в промышленности, административном управлении, обучении; модели информационных процессов передачи, обработки, накопления данных; системный подход к решению функциональных задач и к организации информационных процессов; глобальная, базовая и конкретные информационные технологии;



особенности новых информационных технологий; модели, методы и средства их реализации, объектно-ориентированные среды, функциональное и логическое программирование, информационные технологии в распределенных системах, технологии разработки программного обеспечения.

1.3.16. Сетевые технологии: Классификация сетей; интеграция информационного сервиса пользователей; концепция архитектуры открытых систем как основа построения цифровых сетей интегрального обслуживания (ISDN); основные этапы построения сетей; иерархия моделей процессов в сетях; АТМ-технология; анализ и синтез топологической структуры магистральной и локальной сети; административное и оперативное управление сетью; управление режимами коммутации.

1.3.17. Технологии программирования: Основные этапы решения задач на ЭВМ; критерии качества программы; диалоговые программы; дружелюбность, жизненный цикл программы; постановка задачи и спецификация программы; способы записи алгоритма; стандартные типы данных; представление основных структур программирования; типы данных, определяемые пользователем; записи; файлы; динамические структуры данных; списки; программирование рекурсивных алгоритмов; способы конструирования программ; модульные программы.

1.3.18. Системы искусственного интеллекта: Искусственный интеллект как научное направление, представление знаний, рассуждений и задач; эпистемологическая полнота представления знаний и эвристически эффективные стратегии поиска решения задач; модели представления знаний: алгоритмические, логические, сетевые и продукционные модели; сценарии; экспертные системы: классификация и структура; инструментальные средства проектирования, разработки и отладки; этапы разработки; примеры реализации.

1.3.19. Системы реального времени: Аппаратурная среда, устройство связи с объектом; методы и средства обработки асинхронных событий; концепция процесса; ядро реального времени; механизмы синхронизации и взаимодействия процессов; языки программирования реального времени; программирование синхронной и асинхронной обработки данных.

## **2. Содержание дисциплины**

### **2.1. Федеральный компонент СД Цикл специальных дисциплин**

#### **2.2. Лекционные занятия**

2.2.1. Введение. Методы моделирования в научных исследованиях и образовании. Этапы развития (2 часа).

2.1.2. Тема 1. Аналитические методы моделирования (2 часа).

- 2.1.3. Тема 2. Имитационные методы моделирования (2 часа).
- 2.1.4. Тема 3. Математические модели систем (4 часа).
- 2.1.5. Тема 4. Статистическое моделирование (2 часа).
- 2.1.6. Тема 5. Моделирование дискретных случайных величин (2 часа).
- 2.1.7. Тема 6. Моделирование непрерывной случайной величины (2 часа).
- 2.1.8. Тема 7. Инструментальные средства моделирования (2 часа).

### 2.3. Лабораторные занятия

- 2.3.1. Лабораторная работа №1. Моделирование с использованием математических пакетов (4 часа).
- 2.3.2. Лабораторная работа №2. Моделирование с использованием САД систем (4 часа).
- 2.3.3. Лабораторная работа №3. Моделирование с использованием САЕ систем (4 часа).
- 2.3.4. Лабораторная работа №4. Моделирование с использованием CASE систем (6 часов).

### 2.4. Практические занятия, их наименование и объем.

- 2.4.1. Практическое занятие № 1. Аналитическая модель как система уравнений, при решении которой получают параметры, необходимые для оценки системы (время ответа, пропускную способность и т.д.) (4 часа).
- 2.4.2. Практическое занятие №2. Создание математической модели исследуемой системы (4 часа).
- 2.4.3. Практическое занятие №3. Метод статистических испытаний Монте-Карло (2 часа).
- 2.4.4. Практическое занятие №4. Программная имитация случайных воздействий (2 часа).
- 2.4.5. Практическое занятие №5. Применение метода обратных функций для получения случайных величин (2 часа).
- 2.4.6. Практическое занятие №6. Подготовка данных: отбор данных, необходимых для построения модели, и представление их в соответствующей форме (4 часа).

### 2.5. Самостоятельная работа

Распределение времени по видам самостоятельных работ приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Виды самостоятельных работ

№	Наименование работ	Кол-во часов	Форма отчетности
1	Проработка лекционного материала	10	зачет
2	Подготовка к лабораторным	10	зачет

	занятиям		
3	Подготовка к практическим занятиям	30	реферат, защита
4	Выполнение индивидуальных заданий	40	отчет, защита

## 2.6. Примерные темы рефератов

2.6.1 Моделирование – процесс создание модели исследуемого объекта.

2.6.2 Математический аппарат как основа методов моделирования.

2.6.3 Имитационные методы моделирования для анализа систем.

2.6.4 Типовые математические схемы создания модели.

2.6.5 Способы генерации случайных чисел.

2.6.6 Языки программирования как универсальное средство создания моделей.

2.6.7 Программные комплексы для моделирования конкретной предметной области.

## 2.7. Примерные темы индивидуальных заданий

2.7.1 Разработка модели с использованием объектно-ориентированного способа представления процессов.

2.7.2 Разработка имитационной модели.

2.7.3 Использование сетей Петри для анализа причинно-следственных связей.

2.7.4 Исследование динамической системы (на примере модели движения человека).

2.7.5 Разработка имитационной модели для исследования НДС балки.

## 2.8. Методика формирования текущего рейтинга

Лабораторные занятия, предусмотренные рабочей программой, выполняются согласно расписанию занятий. Собеседование проводится во время экзаменационной сессии. Рейтинг выстроен так, что для получения оценки студенту предоставляется возможность добрать баллы, после выполнения и защиты индивидуальных заданий, лабораторных работ и рефератов на собеседовании. Собеседование предполагает устную проверку знаний студента.

Максимальный рейтинг по дисциплине составляет 120 баллов и определяется по таблице 2. Для получения оценки «отлично» требуется набрать не менее 100 баллов, «хорошо» – 80 баллов.

Таблица 2 – Распределение максимального рейтинга по элементам контроля

№	Виды контроля	Начало (неделя)	Окончание (неделя)	Максим. балл
1	Посещение лекций	1	17	30

2	Лабораторная работа №1	1	2	5
3	Лабораторная работа №2	3	7	10
4	Лабораторная работа №3	8	11	10
5	Лабораторная работа №4	12	13	5
6	Практические занятия	1	17	10
7	Реферат	1	8	20
8	Индивидуальное задание	5	16	20
9	Собеседование	17	17	10
10	Всего баллов	1	17	120

Выполнение заданий в неустановленный срок приводит к снижению рейтинга.

### 3. Литература

#### 3.1. Основная литература:

3.1.1 Максимов Н.В. Современные информационные технологии: учеб.: рек. Мин.обр. РФ/ Н.В.Максимов, Т.Л.Партырка, И.И.Попов. – М.:ФОРУМ, 2008. -512 с.: рис. –Библиогр.: с.:464

3.1.2 SolidWorks 2006: производственно-практическое издание/ Ш.Тику. –СПб.:Питер, 2007. -720 с.

3.1.3 Mathematica для студента: [учеб. пособие]/А.М.Половко. –СПб.: БХВ-Петербург, 2007.

3.1.4 AutoCad 2006: лекции и упражнения/ А.И.Чуприн, В.А.Чуприн. – СПб.: Питер, 2006. -1200 с.

3.1.5 Петров Ю.П. Новые главы теории управления и компьютерных вычислений/ Ю.П.Петров. –СПб.: БХВ-Петербург, 2004.

#### 3.2. Дополнительная литература:

3.2.1 Потемкин А.Е. Твердотельное моделирование в системе КОМПАС-3D/ А.Е.Потемкин. –СПб.: БХВ-Петербург, 2004. -503 с.

3.2.2 Мельников В.П. Информационные технологии: учеб. пособие: рек. УМО/ В.П.Мельников. –М. Академия, 2008. -426 с.

3.2.3 Управляющие системы и автоматика: производственно-практическое издание/ Д.Шмид и др.: пер. с нем. Л.Н.Казанцева. –М.: Техносфера, 2007. -584 с.

3.2.4 Пшихопов В.Х. Оценивание и управление в сложных динамических системах: моног./ В.Х.Пшихопов, М.Ю.Медведев. –М.: Физматлит, 2009. -297 с.

### 4. Учебно – методическая (технологическая) карта дисциплины

Номер недели	Номер темы	изучаемые на лекции Вопросы,	Занятия		Используемые наглядные и методические пособия	Самостоятельная работа магистрантов		Форма контроля
			Практические	Лабораторные		Содержание	Часы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ВВ <sup>1</sup>	2.2.1	2.3.1	2.3.1	3.1.1	3.2.1	10	злр <sup>2</sup>
2	2	2.2.2	2.3.1	2.3.1	3.1.2	3.2.2	10	
3	3	2.2.3	2.3.2	2.3.2	3.1.3	3.2.3	10	
4	4	2.2.4	2.3.2	2.3.2	3.1.4	3.2.4	10	злр
5	4	2.2.4	2.3.3	2.3.3	3.1.3	3.2.3	10	
6	5	2.2.5	2.3.4	2.3.3	3.1.5	3.2.4	10	злр
7	6	2.2.6	2.3.5	2.3.4	3.1.1	3.2.2	10	
9	7	2.2.7	2.3.6	2.3.4	3.1.4	3.2.3	10	
8	8	2.2.8	2.3.6	2.3.4	3.1.5	2.2.2	9	зач. <sup>4</sup>

1. Введение,
2. Защита отчета о выполнении лабораторной работы,
3. Зачет по лабораторным работам,
4. Собеседование по результатам.

### 3. ГРАФИК САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ МАГИСТРАНТОВ

4.

№	Наименование работ	Кол-во часов	Форма отчетности
1	Проработка лекционного материала	10	зачет
2	Подготовка к лабораторным занятиям	10	зачет
3	Подготовка к практическим занятиям	30	реферат, защита

4	Выполнение индивидуальных заданий	40	отчет, защита
---	-----------------------------------	----	---------------

#### 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ МАГИСТРАНТОВ

В течение семестра магистрантам даются для самостоятельного рассмотрения и изучения темы, необходимые для выполнения лабораторных работ.

По каждой лабораторной работе магистранты выполняют отчет, требования к выполнению отчета указаны в методических разработках к лабораторным работам.

- В течение семестра магистранты выполняют контрольные работы по тематике предложенной в рабочей программе. Подготовка к контрольной работе предусматривает изучение материалов лекции и демонстрацию умения решать предложенные задачи в контрольной работе.

- 

#### 5. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНИКОВ И УЧЕБНЫХ ПОСОБИЙ

(дополнительный)

5.1. Клейменов М.С. Системный подход к проектированию сложных систем //Журнал д-ра Добба. 1999. – №1. – С.9-14.

5.2. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования, М. Изд. МГТУ им. Баумана, 2000г.

5.3. Серия ГОСТ 34.XXX "Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы".

5.4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-99 "Информационная технология. Процессы жизненного цикла программных средств".

5.5. РД 50–680–88 Методические указания. Автоматизированные системы. Основные положения.

5.6. Э.Е. Кудряшова. САПР ТП как система интегрированной среды. Интегриро-ванные автоматизированные системы CAD/CAM/CAE: Учеб. пособие / Волгоград: ВолгГТУ, 1998. - 148с.

5.7. Э.Е. Кудряшова. Новые информационные технологии в автоматизированных системах обработки информации и управления: Учеб. пособие/ Волгоград: ВолгГТУ, 2000г. -88с.

5.8. Маклаков С.В. ВРWin, ERWin. CASE – средства разработки информационных систем. –М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999.

5.9. Грекул В.И., Денищенко Г.Н., Коровкина Н.Л. Проектирование информационных систем. /Интернет-университет информационных технологий - ИНТУИТ.ру, 2005.

5.10. Амриш К.И., Ахмед Х.З. Разработка корпоративных Java-приложений с использованием J2EE и UML. /Пер. с англ. -М.: "Вильямс", 2002. - 272 с.

5.11. Боггс У., Боггс М. UML и Rational Rose./ - М.: "ЛОРИ", 2000. - 582 с.

5.12. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. - М.: "Бином", СПб: "Невский диалект", 1999. - 560 с.

5.13. Буч Г., Рамбо Дж., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя. /- М.: ДМК, 2000. - 432 с.

5.14. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. /Паттерны проектирования. - СПб: "Питер", 2001.- 368 с.

## 6. КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

*~~Лекция 1.~~*

### Лекция Введение 1.

#### **Предмет моделирования систем**

Моделирование является основным методом исследований во всех областях знаний и научно обоснованным методом оценок характеристик сложных систем, используемым для принятия решений в различных сферах инженерной деятельности. Существующие и проектируемые системы можно эффективно исследовать с помощью математических моделей, реализуемых на современных ЭВМ, которые в этом случае выступают в качестве инструмента экспериментатора с моделью системы.

#### ***Основные понятия моделирования***

Все то, на что направлена человеческая деятельность, называется объектом. Выработка методологии, позволяющей исследовать состояния объекта или некоторой системы, заключается в упорядочении получения и обработки информации об объектах, которые существуют вне нашего сознания и взаимодействуют между собой и внешней средой.

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

Замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели называется моделированием. Теория замещения оригиналов моделями и исследования их свойств называется теорией моделирования.

Обобщенно моделирование можно определить как метод опосредованного познания, при котором изучаемый объект-оригинал находится в некотором соответствии с другим объектом-моделью, причем модель способна в том или ином отношении замещать оригинал на определенных стадиях познавательного процесса. Стадии познания, на которых происходит такая замена, а также формы соответствия модели и оригинала могут быть различными:

1. моделирование как познавательный процесс, содержащий переработку информации, поступающей из внешней среды, о происходящих в ней явлениях, в результате чего в сознании появляются образы, соответствующие изучаемым объектам;
2. моделирование, заключающееся в построении некоторой системы-модели (второй системы), связанной определенными соотношениями подобия с системой-оригиналом (первой системы), причем в этом случае отображение одной системы в другую является средством выявления зависимостей между двумя системами, отраженными в соотношениях подобия, а не результатом непосредственного изучения поступающей информации.

### ***Особенности разработки систем***

Одна из современных проблем НТП заключается в разработке и внедрении в практику проектирования новейших методов исследования характеристик сложных информационно-управляющих и информационно-вычислительных систем различных уровней. АСОИУ относятся к классу больших систем, этапы проектирования, внедрения, эксплуатации и эволюции которых в настоящее время не возможны без использования различных видов моделирования. Отметим, что на всех перечисленных этапах для сложных видов различных уровней необходимо учитывать следующие особенности:

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



Независимо от разбиения конкретной сложной системы на подсистемы при проектировании каждой из них необходимо выполнить внешнее проектирование (макропроектирование) и внутреннее проектирование (микропроектирование). Т.к. на этих стадиях разработчик преследует разные цели, то и соответственно используемые методы и средства моделирования могут существенно отличаться.

На стадии макропроектирования должна быть разработана обобщенная модель процесса функционирования сложной системы, позволяющая получить ответы на вопросы об эффективности различных стратегий управления объектом при его взаимодействии с внешней средой. Стадию внешнего проектирования можно разбить на анализ и синтез. При анализе изучают объект управления, строят модель воздействий внешней среды, определяют критерии оценки эффективности, имеющиеся ресурсы, необходимые ограничения. Конечная цель стадии анализа – построение модели объекта управления для оценки его характеристик. При синтезе на этапе внешнего проектирования решаются задачи выбора стратегии управления на основе модели объекта моделирования, т.е. сложной системы.

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

### ***Особенности использования моделей***

Выбор метода моделирования и необходимая детализация моделей существенно зависят от этапа разработки сложной системы. На этапах обследования объекта управления, например промышленного предприятия, и разработки технического задания на проектирование автоматизированной системы управления, модели носят преимущественно описательный характер и преследуют цель наиболее полно представить в компактной форме необходимую информацию об объекте.

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

Целевое назначение моделирования на этапе внедрения и эксплуатации сложных систем – это проигрывание возможных ситуаций для принятия обоснованных и перспективных решений по управлению объектом. Моделирование (имитацию) также широко применяют при обучении и тренировке персонала АСУ, вычислительных комплексов и сетей, информационных систем в самых различных сферах. В этом случае

моделирование носит характер деловых игр. Модель, реализуемая обычно на ЭВМ, воспроизводит поведение управляемого объекта и внешней среды, а люди в определенные моменты времени принимают решения по управлению объектом.

АСОИУ—Автоматизированные системы являются системами, которые развиваются по мере эволюции объекта управления, появления новых средств управления и т.д. поэтому при прогнозировании развития сложных систем роль моделирования оказывается очень высокой, т.к. является единственной возможностью ответа на многочисленные вопросы о путях дальнейшего эффективного развития системы и выбора из них наиболее оптимального.

## Лекция 2.

## .Лекция 2.

-

## Тема 1. Основные понятия теории моделирования систем

Моделирование начинается с выработки предмета исследований – системы понятий, отражающих существенные для моделирования характеристики объекта. Отличительной особенностью моделирования сложных систем является его многофункциональность и многообразие способов использования, вследствие которых оно становится неотъемлемой частью всего жизненного цикла системы. Данное обстоятельство объясняется в первую очередь технологичностью моделей, реализованных на базе вычислительной техники, а именно, высокой скоростью получения результатов и их невысокой себестоимостью.

### ***Принципы системного подхода в моделировании систем***

В настоящее время при анализе и синтезе сложных, т.е. больших, составных систем, получил системный подход, который отличается от классического, индуктивного подхода. Отметим, что классический подход рассматривает систему путем перехода от частного к общему и конструирует систему путем слияния ее компонент, синтезируемых по отдельности. В свою очередь системный подход предполагает последовательный переход от общего к частному, причем исследуемый объект виртуально выделяется из окружающей его среды.

— При проектировании и эксплуатации сложных систем приходится иметь дело с системами управления различной сложности, но обладающими одним общим свойством – стремлением достичь определенной цели. Введем некоторые определения: *система S* – целенаправленное множество

взаимосвязанных элементов любой природы; *внешняя среда*  $E$  – множество существующих вне системы элементов любой природы, оказывающих влияние на систему или находящихся под ее воздействием. В зависимости от цели исследования могут рассматриваться разные соотношения между самим объектом  $S$  и внешней средой  $E$ . Таким образом, в зависимости от уровня, объект исследования может выделяться по-разному, а также могут иметь место его различные схемы взаимодействия с внешней средой.

В рамках системного подхода, необходимо четко определить цель моделирования, т.к. в большинстве случаев оказывается невозможным полностью смоделировать реально функционирующую систему (систему-оригинал или первую систему), следовательно, создается конкретная модель (система-модель), соответствующая поставленной проблеме. Таким образом, применительно к вопросам моделирования цель возникает из постановки самой задачи моделирования. Кроме того, важным аспектом является определение структуры системы – совокупности причинно-следственных связей между ее элементами, отражающих их взаимодействие. Структура системы может изучаться извне с точки зрения состава отдельных подсистем и отношений между ними, а также изнутри, если анализируются свойства или функции системы.

В соответствии с выше изложенным, на текущий момент наметились два базовых подхода к исследованию взаимодействия структуры системы с ее свойствами – структурный и функциональный. При структурном подходе выявляются состав выделенных элементов системы  $S$  и связи между ними. Менее общим оказывается функциональное описание структуры системы, т.е. случай, когда рассматриваются ее отдельные функции, под которыми понимаются соответствующие свойства, приводящие к достижению цели. Отметим, что при наличии некоторого эталона сравнения можно ввести качественные и количественные характеристики систем. Проявление функций системы во времени  $S(t)$ , т.е. функционирование системы, означает переход системы из одного состояния в другое или движение в пространстве состояний  $Z$ .

Следует отметить, что создаваемая модель  $M$  некоторой системы с точки зрения системного подхода также является системой, т.е.  $S' = S(M)$ , и может рассматриваться по отношению к внешней среде  $E$ . Наиболее просты по представлению модели, в которых сохраняется прямая аналогия явления. Применяются также модели, не содержащие прямой аналогии, но отражающие общие законы и закономерности поведения элементов системы.

Независимо от типа используемой модели при ее построении необходимо руководствоваться следующими принципами системного подхода:

1. пропорционального и последовательного продвижения по этапам и направления создания модели;

2. согласования информационных, ресурсных, надежностных и других характеристик;
3. правильного соотношения отдельных уровней иерархии в системе моделирования;
4. целостности отдельных обособленных стадий построения модели.

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

### ***Общая характеристика проблемы моделирования систем***

Одновременно с развитием теоретических методов анализа и синтеза совершенствуются и методы экспериментального изучения реальных объектов, а также появляются новые средства исследования. Однако эксперимент был и остается одним из основных и существенных инструментов познания. При объяснении реальных процессов выдвигаются гипотезы, для подтверждения которых ставится эксперимент либо проводятся теоретические рассуждения, подтверждающие их правильность. В широком смысле под экспериментом можно понимать некоторую процедуру организации и наблюдения каких-то явлений, которые осуществляют в условиях, близких к естественным, или имитируют их. Различают пассивный эксперимент, когда исследователь наблюдает протекающий процесс, и активный, когда наблюдатель вмешивается и организует протекание процесса. В последнее время распространен активный эксперимент, поскольку именно на его основе удается выявить критические ситуации, получить наиболее интересные закономерности, обеспечить возможность повторения эксперимента в различных точках и т.д.

В качестве объекта моделирования, как правило, выступают сложные организационно-технические системы, которые можно отнести к классу больших систем, для которых характерно следующее:

1. Цель функционирования, которая определяет степень направленности поведения модели. В этом случае модели могут быть разделены на одноцелевые, предназначенные для решения одной задачи, и многоцелевые, позволяющие разрешить или рассмотреть ряд сторон функционирования объекта.
2. Сложность, которую, учитывая, что модель является совокупностью отдельных элементов и связей между ними, можно оценить по общему числу элементов и их связей в системе. По

разнообразие элементов можно выделить ряд уровней иерархии, отдельные функциональные подсистемы, ряд входов и выходов и т.д.

3. Целостность, указывающая на то, что создаваемая модель является одной цельной системой, т.е. включает в себя определенное количество элементов, находящихся в сложной взаимосвязи друг с другом.

4. Неопределенность, которая проявляется в системе – по состоянию системы, возможности достижения поставленной цели, методам решения задач, достоверности исходной информации и т.д.

5. Поведенческая страта, которая позволяет оценить эффективность достижения системой поставленной цели. В зависимости от наличия случайных воздействий можно различать детерминированные и стохастические системы, по своему поведению – непрерывные, дискретные и т.д.

6. Адаптивность, которая является свойством высокоорганизованной системы. Благодаря адаптивности удается приспособиться к различным внешним возмущающим факторам в широком диапазоне изменения воздействий внешней среды.

7. Организационная структура системы моделирования, которая во многом зависит от сложности модели и степени совершенства средств моделирования. Одним из последних достижений в области моделирования можно считать возможность использования имитационных моделей для проведения машинных экспериментов.

8. Управляемость модели, вытекающая из необходимости обеспечивать управление со стороны экспериментаторов для получения возможности рассмотрения течения процесса в различных условиях, имитирующих реальные.

9. Возможность развития модели, которая, исходя из современного уровня науки и техники, позволяет создавать мощные системы моделирования для исследования многих сторон функционирования реального объекта.

Одним из наиболее важных аспектов построения систем моделирования является проблема цели. Любую модель строят в зависимости от цели, которую ставит перед ней исследователь, поэтому одна из основных проблем при моделировании – это проблема целевого назначения. Для упрощения модели обычно цель подразделяют на подцели, которые позволяют создать более эффективные виды моделей.

Для правильно построенной модели характерным является то, что она выявляет лишь те закономерности, которые действительно нужны исследователю, и не рассматриваем свойства системы, не осуществленные для проводимого исследования. Следует отметить, что оригинал и модель должны быть одновременно сходны по одним и тем же признакам и различны по другим, что позволяет выделить наиболее важные изучаемые свойства. В этом смысле модель выступает как некоторый заместитель

оригинала, обеспечивающий фиксацию и изучение лишь некоторых свойств реального объекта.

Таким образом, характеризуя проблему моделирования в целом, необходимо указать, что от постановки задачи моделирования до интерпретации полученных результатов существует большая группа сложных научно-технических проблем, к основным из которых можно отнести следующие: идентификацию реальных объектов; выбор вида моделей; построение моделей и их машинную реализацию; взаимодействие исследователя с моделью в ходе машинного эксперимента; проверку правильности полученных в ходе моделирования результатов; выявление основных закономерностей, исследованных в процессе моделирования.

### Лекция 3.

### *~~Лекция 3.~~*

#### ***Классификация видов моделирования систем***

В основе моделирования лежит теория подобия, которая утверждает, что абсолютное подобие может иметь место лишь при замене одного объекта другим точно таким же. При моделировании абсолютное подобие, как правило, не имеет места, т.к. используемая модель обычно должна отображать непосредственно исследуемую сторону функционирования объекта. В качестве одного из первых признаков классификации видов моделирования можно выбрать степень полноты модели, т.е. разделить их на полные, неполные и приближенные. В основе полного моделирования лежит полное подобие, которое проявляется как во времени, так и в пространстве. Для неполного моделирования характерно частичное подобие модели изучаемому объекту. В основе приближенного моделирования лежит приближенное подобие, при котором некоторые стороны функционирования реального объекта не моделируются вовсе.

В зависимости от характера изучаемых процессов все виды моделирования могут быть разделены на детерминированные и стохастические, статические и динамические, а также дискретные, непрерывные и дискретно-непрерывные. Детерминированное моделирование отображает процессы, в которых предполагается отсутствие всяких случайных воздействий. Стохастическое моделирование отображает вероятностные процессы и события, в этом случае анализируются ряд реализаций случайного процесса и оцениваются его средние характеристики, т.е. набор однородных реализаций. Статическое моделирование служит для описания поведения объекта в какой-либо момент времени, а динамическое моделирование отображает поведение объекта во времени. Дискретное моделирование служит для описания процессов, которые предполагаются дискретными, соответственно непрерывное моделирование позволяет

отразить непрерывные процессы в системах, в свою очередь дискретно-непрерывное моделирование используется для случаев, когда задачей является выделение наличия как дискретных, так и непрерывных процессов.

В зависимости от формы представления объекта или системы можно выделить реальное и мысленное моделирование. При реальном моделировании (натурном или физическом) используется возможность исследования различных характеристик на реальном объекте целиком или же на его части. Данный вид моделирования является наиболее адекватным, но при этом его возможности ограничены особенностями исследуемых объектов. Натурным моделированием называется проведение исследования на реальном объекте с последующей обработкой результатов эксперимента на основе теории подобия, оно может заключать в научном или производственном экспериментах, а также представлять комплексные испытания. Другим видом реального моделирования является физическое моделирование, которое отличается от натурного тем, что исследование проводится на установках, которые сохраняют природу явлений и обладают физическим подобием. Физическое моделирование может протекать в реальном и псевдореальном масштабах времени, или без учета времени.

Мысленное моделирование, которое может являться наглядным, символическим или математическим, часто является единственным способом моделирования объектов, которые либо практически не реализуемы в заданном интервале времени, либо существуют вне условий, возможных для их физического создания. При наглядном моделировании (гипотетическом, аналоговом или макетировании) на базе научных представлений о реальных объектах создаются различные модели, наглядно отражающие явления и процессы, протекающие в объекте или системе. В основу гипотетического моделирования исследователем закладывается некоторая гипотеза о закономерностях протекания процесса, которая отражает уровень знаний об объекте и базируется на причинно-следственных связях между входом и выходом изучаемого объекта. Аналоговое моделирование основывается на применении аналогий различных уровней, наивысшим уровнем является полная аналогия, имеющая место только для достаточно простых систем. Макетирование применяется в тех случаях, когда протекающие в реальном объекте процессы не поддаются физическому моделированию, либо может предшествовать проведению других видов моделирования, при этом в основе построения макетов также лежат аналогии, базирующиеся на причинно-следственных связях между явлениями и процессами в объекте. Символическое моделирование представляет собой искусственный процесс создания логического объекта, который замещает реальный и выражает основные свойства его отношений с помощью знаков или символов, и может быть языковым или знаковым. Если ввести некоторые условные обозначения отдельных понятий, т.е. знаки, то появляется возможность реализации знакового моделирования, при котором, используя операции объединения, пересечения и дополнения теории множеств, можно в отдельных символах

дать описание какого-то реального объекта. В основе языкового моделирования лежит некоторый тезаурус, который базируется из фиксированного набора входящих понятий. Отметим, что между тезаурусом и обычным словарем имеются принципиальные отличия. Тезаурус – словарь, очищенный от неоднозначности, т.е. в нем каждому слову может соответствовать только единственное понятие.

### *Математическое моделирование*

Под математическим моделированием будем понимать процесс установления соответствия заданному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью, а также исследование этой модели, позволяющие получить характеристики изучаемого реального объекта. Вид математического моделирования зависит как от природы реального объекта, так и задачи исследования, а также требуемой достоверности и точности решения этой задачи. Любая математическая модель описывает объект лишь с некоторой степенью приближения к действительности. Математическое моделирование, реализуемое в рамках исследования характеристик процесса функционирования систем можно разделить на аналитическое, имитационное и комбинированное.

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

- а) аналитическим, когда целью является получение общего вида явных зависимостей для искомых характеристик;
- б) численным, если при отсутствии возможности получения общего решения, требуется получить числовые результаты для конкретных начальных данных;
- в) качественным, если при отсутствии возможности получения общего решения, требуется найти некоторые свойства решения, напр. оценить устойчивость решения.

При имитационном моделировании алгоритм, реализующий математическую модель, воспроизводит процесс функционирования соответствующей системы во времени, при этом имитируются элементарные явления, составляющие исследуемый процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени. Основным преимуществом данного вида по сравнению с аналитическим моделированием является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия



и др. В настоящее время имитационное моделирование представляет наиболее эффективный метод исследования больших систем, а зачастую и единственно практически доступный метод получения информации о поведении системы на этапе ее проектирования.

Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование позволяет объединить достоинства двух выше названных видов математического моделирования. При построении комбинированных моделей проводится предварительная декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие подпроцессы, в последствии там, где возможно используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели. Такой подход позволяет охватить качественно новые классы систем, для исследования которых является невозможным применение аналитического или имитационного подхода в отдельности.

С точки зрения математического описания объекта, в зависимости от его характера, модели можно подразделить на аналоговые (непрерывные), цифровые (дискретные) и аналогово-цифровые (комбинированные). Под аналоговой моделью понимается модель, которая описывается уравнениями, связывающими непрерывные величины. Под цифровой понимают модель, которая описывается уравнениями, связывающими дискретные величины, представленные в цифровом виде. Под аналого-цифровой понимается модель, которая описывается уравнениями, связывающими непрерывные и дискретные величины.

### ***Обеспечение и эффективность машинного моделирования***

Практическая реализация имитационного моделирования требует серьезной подготовки, поэтому любая имитационная система характеризуется обязательным наличием различного рода видов обеспечения.

Математическое обеспечение включает в себя совокупность математических соотношений, описывающих поведение реального объекта, а также совокупность алгоритмов, обеспечивающих как подготовку, так и работу с моделью. Программное обеспечение по своему содержанию включает в себя комплекс программ: планирования вычислительного эксперимента, реализации имитационной модели, практического проведения вычислительного эксперимента, обработки и интерпретации его результатов. Информационное обеспечение включает в себя средства и технологию организации и реорганизации базы данных моделирования, методы логической и физической организации массивов, формы документов, описывающих процесс моделирования и его результаты. Техническое обеспечение включает в себя, прежде всего средства вычислительной техники, связи и обмена информацией между оператором и сетью ЭВМ, ввода и вывода информации, управления проведением вычислительного

эксперимента. Эргономическое обеспечение представляет собой совокупность научных или прикладных методик и методов, а также нормативно-технических и организационно-методических документов, используемых на всех этапах взаимодействия человека с инструментальными средствами.

При имитационном моделировании, так же как и при любом другом методе анализа и синтеза системы, весьма существенен вопрос его эффективности. Эффективность моделирования может оцениваться рядом критериев, в том числе точностью и достоверностью результатов моделирования, временем построения и работы с моделью, затратами машинных ресурсов (времени и памяти), стоимостью разработки и эксплуатации модели. Очевидно, наилучшей оценкой эффективности является сравнение получаемых результатов с данными реальных исследований, т.е. моделирование на реальном объекте при проведении физического или натурного экспериментов.

## **Лекция 4.-**

### **Лекция 4.-**

## **Тема 2.- Математические схемы моделирования систем**

Наибольшие затруднения и наиболее серьезные ошибки, возникающие при моделировании характеристик исследуемых систем, возникают на этапе перехода их от содержательного к формальному описанию. Для упрощения ситуации, применительно к конкретному объекту моделирования обычно используются типовые математические схемы, прошедшие апробацию для конкретного класса систем и показавшие свою эффективность при решении прикладных задач на ЭВМ.

Введение понятия «математическая схема» позволяет рассматривать математику не как метод расчета, а как метод мышления, как средство формулирования понятий, что является наиболее важным при переходе от словесного описания системы к формальному представлению процесса ее функционирования в виде некоторой математической модели (аналитической или имитационной). При пользовании математической схемой исследователя системы в первую очередь должен интересовать вопрос об адекватности отображения в виде конкретных схем реальных процессов в исследуемой системе, а не возможность получения ответа (результата решения) на конкретный вопрос исследования.

### ***Основные подходы к построению математических моделей систем***

Исходной информацией при построении математических моделей процессов функционирования систем служат данные о назначении и условиях работы исследуемой (проектируемой) системы, которые определяют основную цель моделирования и позволяют сформулировать требования к разрабатываемой математической модели. *Математическую схему* можно определить как звено при переходе от содержательного к формальному описанию процесса функционирования системы с учетом воздействия внешней среды, т.е. имеет место цепочка «описательная модель – математическая схема – математическая [аналитическая или (и) имитационная] модель».

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

- совокупность *входных воздействий* на систему –  $x_i$ ;
- совокупность *воздействий внешней среды* –  $v_i$ ;
- совокупность *внутренних (собственных) параметров* системы –  $h_k$ ;
- совокупность *выходных характеристик* системы –  $y_j$ .

При этом в перечисленных подмножествах можно выделить управляемые и неуправляемые переменные. В общем случае  $x_i$ ,  $v_i$ ,  $h_k$ ,  $y_j$  являются элементами непересекающихся подмножеств  $X$ ,  $V$ ,  $H$ ,  $Y$  и содержат как детерминированные, так и стохастические составляющие.

При моделировании системы  $S$  входные воздействия, воздействия внешней среды  $E$  и внутренние параметры системы являются *независимыми (экзогенными) переменными*, которые в векторной форме имеют соответственно вид

$$\vec{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_{n_X}(t));$$

$$\vec{v}(t) = (v_1(t), v_2(t), \dots, v_{n_V}(t));$$

$$\vec{h}(t) = (h_1(t), h_2(t), \dots, h_{n_H}(t)),$$

а выходные характеристики системы являются *зависимыми (эндогенными) переменными* и в векторной форме имеют вид

$$\vec{y}(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_{n_Y}(t)).$$

Процесс функционирования системы  $S$  описывается во времени оператором  $F_s$ , который в общем случае преобразует экзогенные переменные в эндогенные в соответствии с соотношениями вида:

$$\vec{y}(t) = F_s(\vec{x}, \vec{v}, \vec{h}, t). \quad (2.1)$$

Совокупность зависимостей выходных характеристик системы от времени  $y_j(t)$  для всех видов  $j = \overline{1, n_Y}$ , называется *выходной траекторией*  $\vec{y}(t)$ . Зависимость (2.1) называется *законом функционирования системы  $S$*  и обозначается  $F_s$ . В общем случае закон функционирования системы  $F_s$  может быть задан в виде функции, функционала, логических условий, в

алгоритмической и табличной формах или в виде словесного правила соответствия.

Весьма важным для описания и исследования системы  $S$  является понятие *алгоритма функционирования*  $A_s$ , под которым понимается метод получения выходных характеристик с учетом входных воздействий  $\bar{x}(t)$ , воздействий внешней среды  $\bar{v}(t)$  и собственных параметров системы. Очевидно, что один и тот же закон функционирования системы может быть реализован различными способами, т.е. с помощью множества различных алгоритмов  $A_s$ .

Соотношения (2.1) являются математическим описанием поведения объекта (системы) моделирования во времени, т.е. отражают его динамические свойства. Поэтому математические модели такого вида принято называть *динамическими моделями (системами)*.

Для статических моделей математическое описание (2.1) представляет собой отображение между двумя подмножествами свойств моделируемого объекта  $Y$  и  $[X, V, H]$ , что в векторной форме может быть записано как

$$\bar{y} = f(\bar{x}, \bar{v}, \bar{h}). \quad (2.2)$$

Соотношения (2.1) и (2.2) могут быть заданы различными способами: аналитически (с помощью формул), графически, таблично и т. д. Такие соотношения в ряде случаев могут быть получены через свойства системы  $S$  в конкретные моменты времени, называемые *состояниями*. Состояние системы  $S$  характеризуется векторами

$$z' = (z'_1, z'_2, \dots, z'_k) \text{ и } z'' = (z''_1, z''_2, \dots, z''_k),$$

где  $z'_1 = z_1(t')$ ,  $z'_2 = z_2(t')$ , ...,  $z'_k = z_k(t')$ , в момент  $t' \in (t_0, T)$ ;  $z''_1 = z_1(t'')$ ,  $z''_2 = z_2(t'')$ , ...,  $z''_k = z_k(t'')$  в момент  $t'' \in (t_0, T)$  и т.д.,  $k = \overline{1, n_z}$ .

Если рассматривать процесс функционирования системы  $S$  как последовательную смену состояний  $z_1(t)$ ,  $z_2(t)$ , ...,  $z_k(t)$ , то они могут быть интерпретированы как координаты точки в  $k$ -мерном фазовом пространстве, причем каждой реализации процесса будет соответствовать некоторая фазовая траектория. Совокупность всех возможных значений состояний  $\{z\}$  называется *пространством состояний* объекта моделирования  $Z$ , причем  $z_k \in Z$ .

Состояния системы  $S$  в момент времени  $t_0 < t^* \leq T$  полностью определяются начальными условиями  $z^0 = (z_1^0, z_2^0, \dots, z_k^0)$  [где  $z_1^0 = z_1(t_0)$ ,  $z_2^0 = z_2(t_0)$ , ...,  $z_k^0 = z_k(t_0)$ ], входными воздействиями  $x(t)$ , внутренними параметрами  $h(t)$  и воздействиями внешней среды  $v(t)$ , которые имели место за промежуток времени  $t^* - t_0$ , с помощью двух векторных уравнений:

$$z(t) = \Phi(z^0, x, v, h, t); \quad (2.3)$$

$$y(t) = F(z, t). \quad (2.4)$$

Первое уравнение по начальному состоянию  $z^0$  и экзогенным переменным  $x, v, h$  определяет вектор-функцию  $z(t)$ , а второе по

полученному значению состояний  $z(t)$  – эндогенные переменные на выходе системы  $y(t)$ . Таким образом, цепочка уравнений объекта «вход – состояния – выход» позволяет определить характеристики системы:

$$y(t) = F[\Phi(z^0, x, v, h, t)]. \quad (2.5)$$

В общем случае время в модели системы  $S$  может рассматриваться на интервале моделирования  $(0, T)$  как непрерывное, так и дискретное, т.е. квантованное на отрезки длиной  $\Delta t$  временных единиц каждый, когда  $T = m\Delta t$ , где  $m = \overline{1, m_T}$  число интервалов дискретизации.

Таким образом, под *математической моделью объекта* (реальной системы) понимают конечное подмножество переменных  $\{x(t), v(t), h(t)\}$  вместе с математическими связями между ними и характеристиками  $y(t)$ .

Если математическое описание объекта моделирования не содержит элементов случайности или они не учитываются, т.е. если можно считать, что в этом случае стохастические воздействия внешней среды  $v(t)$  и стохастические внутренние параметры  $h(t)$  отсутствуют, то модель называется *детерминированной* в том смысле, что характеристики однозначно определяются детерминированными входными воздействиями

$$y(t) = f(x, t). \quad (2.6)$$

Очевидно, что детерминированная модель является частным случаем стохастической модели.

Приведенные математические соотношения представляют собой математические схемы общего вида и позволяют описать широкий класс систем. Однако в практике моделирования объектов в области системотехники и системного анализа на первоначальных этапах исследования системы рациональнее использовать  *типовые математические схемы*: дифференциальные уравнения, конечные и вероятностные автоматы, системы массового обслуживания, сети Петри и т.д.

Не обладая такой степенью общности, как рассмотренные модели, типовые математические схемы имеют преимущества простоты и наглядности, но при существенном сужении возможностей применения. В качестве детерминированных моделей, когда при исследовании случайные факторы не учитываются, для представления систем, функционирующих в непрерывном времени, используются дифференциальные, интегральные, интегро-дифференциальные и другие уравнения, а для представления систем, функционирующих в дискретном времени, - конечные автоматы и конечно-разностные схемы. В качестве стохастических моделей (при учете случайных факторов) для представления систем с дискретным временем используются вероятностные автоматы, а для представления системы с непрерывным временем – системы массового обслуживания и т.д.

Перечисленные типовые математические схемы, естественно, не могут претендовать на возможность описания на их базе всех процессов,

происходящих в больших информационно-управляющих системах. Для таких систем в ряде случаев более перспективным является применение агрегативных моделей. Агрегативные модели (системы) позволяют описать широкий круг объектов исследования с отображением системного характера этих объектов. Именно при агрегативном описании сложный объект (система) расчленяется на конечное число частей (подсистем), сохраняя при этом связи, обеспечивающие взаимодействие частей.

Таким образом, при построении математических моделей процессов функционирования систем можно выделить следующие основные подходы: непрерывно-детерминированный (например, дифференциальные уравнения); дискретно-детерминированный (конечные автоматы); дискретно-стохастический (вероятностные автоматы); непрерывно-стохастический (системы массового обслуживания); обобщенный, или универсальный (агрегативные системы).

***Лекция 5.***

***Лекция 5.***

***Непрерывно-детерминированные модели (D-схемы)***

Рассмотрим особенности непрерывно-детерминированного подхода на примере использования в качестве математических моделей дифференциальных уравнений. *Дифференциальными уравнениями* называются такие уравнения, в которых неизвестными будут функции одной или нескольких переменных, причем в уравнение входят не только функции, но и их производные различных порядков. Если неизвестные — функции многих переменных, то уравнения называются *уравнениями в частных производных*, в противном случае при рассмотрении функции только одной независимой переменной уравнения называются *обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ)*.

Обычно в таких математических моделях в качестве независимой переменной, от которой зависят неизвестные искомые функции, служит время  $t$ . Тогда математическое соотношение для детерминированных систем (2.6) в общем виде будет

$$y' = f(y, t); \quad y(t_0) = y_0,$$

где  $\vec{y}' = \frac{dy}{dt}$ ,  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  и  $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$  —  $n$ -мерные векторы;  $f(y, t)$  — вектор-функция, которая определена на некотором  $(n+1)$ -мерном  $(y, t)$  множестве и является непрерывной. Так как математические схемы такого вида отражают динамику изучаемой системы, т.е. ее поведение во времени, то они называются *D-схемами* (от англ. dynamic).

В простейшем случае ОДУ имеет вид:

$$h_0 \frac{d^2 z(t)}{d^2 t} + h_1 \frac{dz(t)}{dt} + h_2 z(t) = 0,$$

где  $h_0, h_1, h_2$  – параметры системы;  $z(t)$  – состояние системы в момент времени  $t$ .

Если изучаемая система взаимодействует с внешней средой  $E$ , то появляется входное воздействие  $x(t)$  и непрерывно-детерминированная модель такой системы будет иметь вид:

$$h_0 \frac{d^2 z(t)}{d^2 t} + h_1 \frac{dz(t)}{dt} + h_2 z(t) = x(t).$$

С точки зрения общей схемы математической модели  $x(t)$  является входным (управляющим) воздействием, а состояние системы  $S$  в данном случае можно рассматривать как выходную характеристику, т.е. полагать, что выходная переменная совпадает с состоянием системы в данный момент времени  $y=z$ .

При решении задач системотехники важное значение имеют проблемы управления большими системами. Следует обратить внимание на системы автоматического управления – частный случай динамических систем, описываемых  $D$ -схемами и выделенных в отдельный класс моделей в силу их практической специфики. Описывая процессы автоматического управления, придерживаются обычно представления реального объекта в виде двух систем: управляющей и управляемой (объекта управления).

~~– Лекция 6 –~~

## Лекция 6.

### ***Дискретно-детерминированные модели (F-схемы)***

Особенности дискретно-детерминированного подхода на этапе формализации процесса функционирования систем рассмотрим на примере использования в качестве математического аппарата теории автоматов. Теория автоматов – это раздел теоретической кибернетики, в котором изучаются математические модели – автоматы. На основе этой теории система представляется в виде автомата, перерабатывающего дискретную информацию и меняющего свои внутренние состояния лишь в допустимые моменты времени. Понятие «автомат» варьируется в зависимости от характера конкретно изучаемых систем, от принятого уровня абстракции и целесообразной степени общности. Автомат можно представить как некоторое устройство (черный ящик), на которое подаются входные сигналы и снимаются выходные и которое может иметь некоторые внутренние состояния. Конечным автоматом называется автомат, у которого множество внутренних состояний  $a$ , следовательно, и множество выходных сигналов

являются конечными множествами. Абстрактно конечный автомат (от англ. finite automat) можно представить как математическую схему, характеризующуюся шестью элементами: конечным множеством  $X$  входных сигналов (входным алфавитом); конечным множеством  $Y$  выходных сигналов (выходным алфавитом); конечным множеством  $Z$  внутренних состояний (внутренним алфавитом или алфавитом состояний); начальным состоянием  $z_0 \in Z$ ; функцией переходов  $\varphi(z, x)$ ; функцией выходов  $\psi(z, x)$ .

Автомат, задаваемый  $F$ -схемой:  $F = \langle Z, X, Y, \varphi, \psi, z_0 \rangle$  – функционирует в дискретном автоматном времени, моментами которого являются такты, т.е. примыкающие друг к другу равные интервалы времени, каждому из которых соответствуют постоянные значения входного и выходного сигналов и внутренние состояния. Если обозначить состояние, а также входной и выходной сигналы, соответствующие  $t$ -му такту при  $t = 0, 1, 2, \dots$ , через  $z(t)$ ,  $x(t)$ ,  $y(t)$ . При этом  $z(0) = z_0$ ,  $z(t) \in Z$ ,  $x(t) \in X$ ,  $y(t) \in Y$ . Абстрактный конечный автомат имеет один входной и один выходной каналы. В каждый момент дискретного времени  $F$ -автомат находится в определенном состоянии  $z(t)$  из множества  $Z$  состояний автомата, причем в начальный момент времени  $t=0$  он всегда находится в начальном состоянии  $z(0) = z_0$ . В момент  $t$ , будучи в состоянии  $z(t)$ , автомат способен воспринять на входном канале сигнал  $x(t) \in X$  и выдать на выходном канале сигнал  $y(t) = \psi [z(t), x(t)]$ , переходя в состояние  $z(t+1) = \varphi [z(t), x(t)]$ ,  $x(t) \in X$ ,  $y(t) \in Y$ . Абстрактный конечный автомат реализует некоторое отображение множества слов входного алфавита  $X$  на множество слов выходного алфавита  $Y$ . Другими словами, если на вход конечного автомата, установленного в начальное состояние  $z_0$ , подавать в некоторой последовательности буквы входного алфавита  $x(0), x(1), x(2), \dots$ , т.е. входное слово, то на выходе автомата будут появляться буквы выходного алфавита  $y(0), y(1), y(2), \dots$ , образуя выходное слово. Таким образом, работа конечного автомата происходит по следующей схеме: в каждом  $t$ -м такте на вход автомата, находящегося в состоянии  $z(t)$ , подается некоторый сигнал  $x(t)$ , на который он реагирует переходом в  $(t+1)$ -м такте в новое состояние  $z(t+1)$  и выдачей некоторого выходного сигнала.

По числу состояний различают конечные автоматы с памятью и без памяти. Автоматы с памятью имеют более одного состояния, а автоматы без памяти (комбинационные или логические схемы) обладают лишь одним состоянием. По характеру отсчета дискретного времени конечные автоматы делятся на синхронные и асинхронные. В синхронных  $F$ -автоматах моменты времени, в которые автомат «считывает» входные сигналы, определяются принудительно синхронизирующими сигналами. Асинхронный  $F$ -автомат считывает входной сигнал непрерывно, и поэтому, реагируя на достаточно длинный входной сигнал постоянной величины  $x$ , он может несколько раз изменять состояние, выдавая соответствующее число выходных сигналов, пока не перейдет в устойчивое, которое уже не может быть изменено данным входным сигналом.

### ***Дискретно-стохастические модели (P-схемы)***



Рассмотрим особенности построения математических схем при дискретно-стохастическом подходе к формализации процесса функционирования исследуемой системы. Так как сущность дискретизации времени при этом подходе остается аналогичной рассмотренным в конечных автоматах, то влияние фактора стохастичности проследим также на разновидности таких автоматов, а именно на вероятностных (стохастических) автоматах.

В общем виде вероятностный автомат (англ. probabilistic automat) можно определить как дискретный потактный преобразователь информации с памятью, функционирование которого в каждом такте зависит только от состояния памяти в нем и может быть описано статистически. Применение схем вероятностных автоматов имеет важное значение для разработки методов проектирования дискретных систем, проявляющих статистически закономерное случайное поведение, для выяснения алгоритмических возможностей таких систем и обоснования границ целесообразности их использования, а также для решения задач синтеза по выбранному критерию дискретных стохастических систем, удовлетворяющих заданным ограничениям.

Введем математическое понятие  $P$ -автомата, используя понятия, введенные для  $F$ -автомата. Рассмотрим множество  $G$ , элементами которого являются всевозможные пары  $(x_i, z_s)$ , где  $x_i$  и  $z_s$  – элементы входного подмножества  $X$  и подмножества состояний  $Z$  соответственно. Если существуют две такие функции  $\varphi$  и  $\psi$ , то с их помощью осуществляются отображения  $G \rightarrow Z$  и  $G \rightarrow Y$ , то говорят, что  $F = \langle Z, X, Y, \varphi, \psi \rangle$  определяет автомат детерминированного типа. Введем в рассмотрение более общую математическую схему. Пусть  $\Phi$  – множество всевозможных пар вида  $(z_k, y_j)$  где  $y_j$  – элемент выходного подмножества  $Y$ . Потребуем, чтобы любой элемент множества  $G$  индуцировал на множестве  $\Phi$  некоторый закон распределения следующего вида:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Элементы из } \Phi & \dots & (z_1, y_1) & \dots & (z_1, y_2) & \dots & \dots & (z_k, y_{j-1}) & (z_k, y_j) \\ (x_i, z_k) & \dots & b_{11} & \dots & b_{12} & \dots & \dots & b_{k(j-1)} & b_{kj} \end{array}$$

При этом  $\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J b_{kj} = 1$ ,

где  $b_{kj}$  – вероятности перехода автомата в состояние  $z_k$  и появления на выходе сигнала  $y_j$ , если он был в состоянии  $z_s$  и на его вход в этот момент времени поступил сигнал  $x_i$ . Число таких распределений, представленных в виде таблиц, равно числу элементов множества  $G$ . Обозначим множество этих таблиц через  $B$ , тогда четверка элементов  $P = \langle Z, X, Y, B \rangle$  называется вероятностным автоматом ( $P$ -автоматом).

## Непрерывно-стохастические модели ( $Q$ -схемы)

Особенности непрерывно-стохастического подхода рассмотрим на примере использования в качестве типовых математических схем систем массового обслуживания (англ. queueing system), которые будем называть  $Q$ -схемами. Системы массового обслуживания представляют собой класс математических схем, разработанных в теории массового обслуживания и различных приложениях для формализации процессов функционирования систем, которые по своей сути являются процессами обслуживания.

В качестве процесса обслуживания могут быть представлены различные по своей физической природе процессы функционирования экономических, производственных, технических и других систем, например заявки на обработку информации ЭВМ от удаленных терминалов и т.д. При этом характерным для работы таких объектов является случайное появление заявок (требований) на обслуживание и завершение обслуживания в случайные моменты времени, т.е. стохастический характер процесса их функционирования. В любом элементарном акте обслуживания можно выделить две основные составляющие: ожидание обслуживания заявкой и собственно обслуживание заявки. Это можно изобразить в виде некоторого  $i$ -го прибора обслуживания  $\Pi_i$ , состоящего из накопителя заявок  $H_i$ , в котором может одновременно находиться  $l_i = \overline{0, L_i^H}$  заявок, где  $L_i^H$  — емкость  $i$ -го накопителя, и канала обслуживания заявок (или просто канала)  $K_i$ . На каждый элемент прибора обслуживания  $\Pi_i$  поступают потоки событий: в накопитель  $H_i$  — поток заявок  $w_i$  на канал  $K_i$  — поток обслуживания  $u_i$ .

В практике моделирования систем, имеющих более сложные структурные связи и алгоритмы поведения, для формализации используются не отдельные приборы обслуживания, а  $Q$ -схемы, образуемые композицией многих элементарных приборов обслуживания  $\Pi_i$  (сети массового обслуживания). Если каналы  $K_i$  различных приборов обслуживания соединены параллельно, то имеет место многоканальное обслуживание (многоканальная  $Q$ -схема), а если приборы  $\Pi_i$  и их параллельные композиции соединены последовательно, то имеет место многофазное обслуживание (многофазная  $Q$ -схема). Таким образом, для задания  $Q$ -схемы необходимо использовать оператор сопряжения  $R$ , отражающий взаимосвязь элементов структуры (каналов и накопителей) между собой. Различают разомкнутые и замкнутые  $Q$ -схемы. В разомкнутой  $Q$ -схеме выходной поток обслуженных заявок не может снова поступить на какой-либо элемент, т. е. обратная связь отсутствует, а в замкнутых  $Q$ -схемах имеются обратные связи, по которым заявки двигаются в направлении, обратном движению вход-выход.

Возможности оценки характеристик с использованием аналитических моделей теории массового обслуживания являются весьма ограниченными по сравнению с требованиями практики исследования и проектирования систем, формализуемых в виде  $Q$ -схем. Несравненно большими

возможностями обладают имитационные модели, позволяющие исследовать  $Q$ -схему, задаваемую без ограничений.

### **Сетевые модели ( $N$ -схемы)**

В практике моделирования объектов часто приходится решать задачи, связанные с формализованным описанием и анализом причинно-следственных связей в сложных системах, где одновременно параллельно протекает несколько процессов. Самым распространенным в настоящее время формализмом, описывающим структуру и взаимодействие параллельных систем и процессов, являются сети Петри (от англ. Petri Nets).

Формально сеть Петри ( $N$ -схема) задается четверкой вида:

$$N = \langle B, D, I, O \rangle,$$

где  $B$  – конечное множество символов, называемых позициями;  $D$  – конечное множество символов, называемых переходами;  $I$  – входная функция (прямая функция инцидентности);  $O$  – выходная функция (обратная функция инцидентности). Таким образом, входная функция  $I$  отображает переход  $d_j$  в множество выходных позиций  $b_i \in I(d_j)$ , а выходная функция  $O$  отображает переход  $d_j$  в множество выходных позиций  $b_i \in D(d_j)$ .

Графически  $N$ -схема изображается в виде двудольного ориентированного мультиграфа, представляющего собой совокупность позиций и переходов. Граф  $N$ -схемы имеет два типа узлов: позиции и переходы, изображаемые 0 и 1 соответственно. Ориентировочные дуги соединяют позиции и переходы, причем каждая дуга направлена от элемента одного множества (позиции или перехода) к элементу другого множества (переходу или позиции). Граф  $N$ -схемы является мультиграфом, так как он допускает существование кратных дуг от одной вершины к другой.

Приведенное представление  $N$ -схемы может использоваться только для отражения статики моделируемой системы (взаимосвязи событий и условий), но не позволяет отразить в модели динамику функционирования моделируемой системы. Для представления динамических свойств объекта вводится функция маркировки (разметки)  $M: B \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ . Маркировка  $M$  есть присвоение неких абстрактных объектов, называемых метками (фишками), позициям  $N$ -схемы, причем количество меток, соответствующее каждой позиции, может меняться. При графическом задании  $N$ -схемы разметка отображается помещением внутри вершин-позиций соответствующего числа точек (когда количество точек велико, ставят цифры). Маркированная (размеченная)  $N$ -схема может быть описана в виде пятерки  $N_M = \langle B, D, I, O, M \rangle$  и является совокупностью сети Петри и маркировки  $M$ .

Функционирование  $N$ -схемы отражается путем перехода от разметки к разметке. Начальная разметка обозначается как  $M_0: B \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ . Смена разметок происходит в результате срабатывания одного из переходов  $d_j \in D$

сети. Необходимым условием срабатывания перехода  $d_j$  является  $b_i \in I(d_j) \{M(b_i) \geq 1\}$ , где  $M(b_i)$  – разметка позиции  $b_i$ . Переход  $d_j$ , для которого выполняется указанное условие, определяется как находящийся в состоянии готовности к срабатыванию или как возбужденный переход.

### ***Комбинированные модели (А-схемы)***

Наиболее известным общим подходом к формальному описанию процессов функционирования систем является подход, предложенный Я.П. Бусленко. Этот подход позволяет описывать поведение непрерывных и дискретных, детерминированных и стохастических систем, т. е. по сравнению с рассмотренными является обобщенным (универсальным) и базируется на понятии *агрегативной системы* (от англ. aggregate system), представляющей собой формальную схему общего вида, которую будем называть *А-схемой*.

Анализ существующих средств моделирования систем и задач, решаемых с помощью метода моделирования на ЭВМ, неизбежно приводит к выводу, что комплексное решение проблем, возникающих в процессе создания и машинной реализации модели, возможно лишь в случае, если моделирующие системы имеют в своей основе единую формальную математическую схему, т.е. *А-схему*. Такая схема должна одновременно выполнять несколько функций: являться адекватным математическим описанием объекта моделирования, т. е. системы  $S$ , служить основой для построения алгоритмов и программ при машинной реализации модели  $M$ , позволять в упрощенном варианте (для частных случаев) проводить аналитические исследования.

Приведенные требования в определенной степени противоречивы. Тем не менее, в рамках обобщенного подхода на основе *А-схем* удается найти между ними некоторый компромисс.

По традиции, установившейся в математике вообще и в прикладной математике в частности, при агрегативном подходе сначала дается формальное определение объекта моделирования – агрегативной системы, которая является математической схемой, отображающей системный характер изучаемых объектов. При агрегативном описании сложный объект (система) разбивается на конечное число частей (подсистем), сохраняя при этом связи, обеспечивающие их взаимодействие. Если некоторые из полученных подсистем оказываются в свою очередь еще достаточно сложными, то процесс их разбиения продолжается до тех пор, пока не образуются подсистемы, которые в условиях рассматриваемой задачи моделирования могут считаться удобными для математического описания. В результате такой декомпозиции сложная система представляется в виде многоуровневой конструкции из взаимосвязанных элементов, объединенных в подсистемы различных уровней.

В качестве элемента *А-схемы* выступает агрегат, а связь между агрегатами (внутри системы  $S$  и с внешней средой  $E$ ) осуществляется с

помощью оператора сопряжения  $R$ . Очевидно, что агрегат сам может рассматриваться как  $A$ -схема, т. е. может разбиваться на элементы (агрегаты) следующего уровня. Любой агрегат характеризуется следующими множествами: моментов времени  $T$ , входных  $X$  и выходных  $Y$  сигналов, состояний  $Z$  в каждый момент времени  $t$ . Состояние агрегата в момент времени  $t \in T$  обозначается как  $z(t) \in Z$ , а входные и выходные сигналы — как  $x(t) \in X$  и  $y(t) \in Y$  соответственно.

Существует класс больших систем, которые ввиду их сложности не могут быть формализованы в виде математических схем одиночных агрегатов, поэтому их формализуют некоторой конструкцией из отдельных агрегатов  $A_n$ ,  $n = \overline{1, N_A}$ , которую назовем агрегативной системой или  $A$ -схемой. Для описания некоторой реальной системы  $S$  в виде  $A$ -схемы необходимо иметь описание как отдельных агрегатов  $A_n$ , так и связей между ними.

Функционирование  $A$ -схемы связано с переработкой информации. Вся информация, циркулирующая в  $A$ -схеме, делится на внешнюю и внутреннюю. Внешняя информация поступает от внешних объектов, не являющихся элементами рассматриваемой схемы, а внутренняя информация вырабатывается агрегатами самой  $A$ -схемы. Обмен информацией между  $A$ -схемой и внешней средой  $E$  происходит через агрегаты, которые называются полюсами  $A$ -схемы. При этом различают входные полюсы  $A$ -схемы, представляющие собой агрегаты, на которые поступают  $x$ -сообщения, и выходные полюсы  $A$ -схемы, выходная информация которых является  $y$ -сообщениями. Агрегаты, не являющиеся полюсами, называются внутренними.

## Лекция 8.

## Лекция 8.

### Тема 3. Формализация и алгоритмизация процессов

#### моделирования систем

Несмотря на многообразие классов моделируемых систем и наличие широких возможностей реализации машинных моделей на современных ЭВМ, можно выделить основные закономерности перехода от построения концептуальной модели объекта моделирования к проведению машинного эксперимента с моделью системы. При этом для достижения эффективного решения пользователем практических задач моделирования последовательность проработки этапов разработки и машинной реализации моделей является возможным рационально оформить в виде определенной методики.

## *Методика разработки и машинной реализации моделей систем*

С развитием вычислительной техники наиболее эффективным методом исследования больших систем стало машинное моделирование, без которого невозможно решение многих исследовательских или инженерных проблем. Поэтому одной из актуальных задач в этой области является освоение теории и методов математического моделирования с учетом требований системности, позволяющих не только строить модели изучаемых объектов, анализировать их динамику и возможность управления машинным экспериментом с моделью, но и судить в известной мере об адекватности создаваемых моделей исследуемым системам и границах их применимости, а также правильно организовывать моделирование на современных ЭВМ.

Сущность машинного моделирования системы состоит в проведении вычислительного эксперимента с моделью, которая представляет собой некоторый программный комплекс, описывающий формально и (или) алгоритмически поведение элементов системы в процессе ее функционирования, т.е. картину их взаимодействия друг с другом и внешней средой. Машинное моделирование с успехом применяется тогда, когда трудно четко сформулировать критерий оценки качества функционирования системы или ее цель не поддается полной формализации, поскольку оно позволяет сочетать программно-технические возможности ЭВМ со способностью человека мыслить неформальными категориями.

Сформулируем основные требования, предъявляемые к модели функционирования системы:

1. Полнота модели должна предоставлять пользователю возможность получения необходимого набора оценок характеристик системы с требуемой точностью и достоверностью.
2. Гибкость модели должна давать возможность воспроизведения различных ситуаций при варьировании структуры, алгоритмов и параметров системы.
3. Длительность разработки и реализации модели большой системы должна быть минимальной при учете ограничений на имеющиеся ресурсы.
4. Структура модели должна быть блочной, т.е. допускать возможность замены, добавления и исключения некоторых частей без переделки всей модели.
5. Информационное обеспечение должно предоставлять возможность эффективной работы модели с базой данных систем определенного класса.
6. Программные и технические средства должны обеспечивать эффективную (по быстродействию и памяти) машинную реализацию модели и удобное общение с ней пользователя.
7. Должно быть реализовано проведение целенаправленных (планируемых) машинных экспериментов с моделью системы с использованием

аналитико-имитационного подхода при наличии ограниченности машинных ресурсов.

Моделирование систем с помощью ЭВМ можно использовать:

- a) для исследования системы до того, как она спроектирована, с целью определения чувствительности характеристики к изменениям структуры алгоритмов и параметров объекта моделирования и внешней среды;
- b) на этапе проектирования системы для анализа и синтеза различных вариантов системы и выбора варианта, который удовлетворял бы заданному критерию оценки эффективности системы при принятых ограничениях;
- c) после завершения проектирования и внедрения системы, т.е. при ее эксплуатации, для получения информации, дополняющей результаты натурных испытаний реальной системы, и для получения прогнозов эволюции системы во времени.

К основным этапам моделирования системы относятся:

- I. построение концептуальной модели системы и ее формализация;
- II. алгоритмизация модели системы и ее машинная реализация;
- III. получение и интерпретация результатов моделирования системы.

### *Построение концептуальной модели системы и ее формализация*

Основным назначением этапа построения концептуальной модели системы и ее формализации является реализация перехода от содержательного описания объекта к его математической модели, т.е. формализация. Наиболее ответственными в этой работе моментами оказываются проведение границы между системой и внешней средой, упрощение описания системы и построение сначала концептуальной, а затем формальной модели системы. Модель должна быть адекватной, иначе невозможно получить положительные результаты моделирования, т.е. исследование процесса функционирования системы на неадекватной модели теряет смысл. Под адекватной моделью будем понимать модель, которая с определенной степенью приближения на уровне понимания системы, моделируемой разработчиком, отражает процесс ее функционирования во внешней среде.

— Наиболее рационально строить модель системы по блочному принципу. При этом могут быть выделены три автономные группы блоков такой модели:

1. блоки представляющие собой имитатор воздействия внешней среды;
2. блоки, являющиеся собственно моделью исследуемой системы;
3. вспомогательные блоки, обеспечивающие машинную реализацию блоков первых групп, а также фиксацию и обработку результатов моделирования.

После перехода от описания моделируемой системы к ее модели, построенной по блочному принципу необходимо сформировать математические модели процессов, происходящих в различных блоках. На практике получение модели достаточно простого вида для больших систем чаще всего невозможно, поэтому процесс функционирования системы разбивают на ряд элементарных подпроцессов, учитывая возможность последующей формализации их моделей с помощью типовых математических схем.

Рассмотрим подэтапы первого этапа моделирования.

1.1. Постановка задачи машинного моделирования системы. Дается четкая формулировка задачи исследования конкретной системы. Основное внимание уделяется: обоснованию актуальности задачи и необходимости машинного моделирования; выбору методики решения задачи с учетом имеющихся ресурсов; определению масштаба задачи и возможности ее разбиения на подзадачи.

1.2. Анализ задачи моделирования системы. Способствует преодолению трудностей, возникающих при практическом моделировании системы. Основное внимание уделяется: выбору критериев оценки эффективности процесса функционирования системы; определению эндогенных и экзогенных переменных модели; выбору возможным методов идентификации; выполнению предварительного содержания этапа получения и интерпретации результатов моделирования системы.

1.3. Определение требований к исходной информации об объекте моделировании и организация ее сбора. Основное внимание уделяется: выбору необходимой информации о системе и внешней среде; подготовке априорных данных; анализу имеющихся экспериментальных данных; выбору методов и средств предварительной обработки информации о системе.

1.4. Выдвижение гипотез и принятие решений. Основное внимание уделяется: определению объема имеющейся информации для решения задачи; выделению подзадач, для которых информация недостаточна; установке ограничения на временные ресурсы решения задачи; выяснение ожидаемых результатов моделирования.

1.5. Определение параметров и переменных модели. Описание каждого параметра и переменной должно даваться в следующей форме: определение и краткая характеристика; символ обозначения и единица измерения; диапазон изменения; место применения в модели.

1.6. Установление основного содержания модели. Учитываются: формулировка задачи моделирования системы; структура системы и алгоритмы ее поведения; возможные методы и средства решения задачи моделирования.

1.7. Обоснование критериев оценки эффективности системы. Сводится к получению функции параметров и переменных системы, представляющей собой поверхность отклика в исследуемой области их изменения, которая позволяет определить реакцию системы. Эффективность системы можно



оценивать с помощью интегральных или частных критериев, выбор которых зависит от конкретно рассматриваемой задачи.

1.8. Определение процедур аппроксимации: детерминированной; вероятностной; определения средних значений.

1.9. Описание концептуальной модели системы. Представляет собой: описание концептуальной модели в абстрактных терминах и понятиях; описание модели с помощью типовых математических схем; окончательное принятие гипотез и предположений; обоснование выбора процедур аппроксимации реальных процессов при построении модели.

1.10. Проверка достоверности концептуальной модели. Включает: проверку замысла модели; оценку достоверности исходной информации; рассмотрение постановки задачи моделирования; анализ принятых аппроксимаций; исследование гипотез и предположений.

1.11. Составление технической документации по первому этапу. Технический отчет включает в себя: подробную постановку задачи моделирования системы; анализ задачи моделирования системы; критерии оценки эффективности системы; параметры и переменные модели системы; гипотезы и предположения принятые при построении модели; описание модели в абстрактных терминах и понятиях; описание ожидаемых результатов моделирования системы.

## Лекция 9.

### ~~Лекция 9.~~

#### **Алгоритмизация моделей систем и их машинная реализация**

Основным назначением этапа алгоритмизации модели системы и ее машинной реализации является практическое воплощение формализованной концептуальной, т.е. математической модели системы, полученной на первом этапе моделирования, в ее конкретную машинную модель. Процесс функционирования системы  $S$  можно рассматривать как последовательную смену ее состояний  $z(t)$  в  $k$ -мерном пространстве. Очевидно, что задачей моделирования является построение функций  $z$ , на основании которых можно провести вычисление интересующих исследователя характеристик функционирования системы. Для этого должны иметься соотношения, связывающие функции  $z$  с переменными, параметрами и временем, а также начальные условия  $z^0 = (z_1^0, z_2^0, \dots, z_k^0)$ .

Наиболее универсальным методом, позволяющим определить последовательные состояния процесса функционирования системы, является моделирование ее характеристик через заданные интервалы времени, так называемый *принцип  $\Delta t$* . Однако он часто оказывается не экономичным с точки зрения машинного времени. При рассмотрении процессов функционирования некоторых систем можно обнаружить, что для них характерны два типа состояний. Во-первых, особые, присущие процессу в

некоторые моменты времени, которые характерны скачкообразными изменениями координат  $z_i(t)$ . Во-вторых, неособые состояния, в которых процесс находится все остальное время, для которых  $z_i(t)$  изменяются плавно и непрерывно или не изменяются совсем. Таким образом, следя только за особыми состояниями системы, можно получать основную информацию, необходимую для построения всего множества  $z_i(t)$ . Подобный метод называется принципом особых состояний или *принципом  $\delta z$* .

Весьма удобной формой представления логической структуры моделей процессов функционирования систем и машинных программ является схема. На различных этапах моделирования составляются обобщенные и детальные логические схемы, а также схемы программ. Требования к оформлению подобных схемы оговорены ГОСТ 19.701-90, входящим в состав Единой системы программной документации. Кроме того, могут использоваться и другие формы представления моделирующих алгоритмов, например граф-схемы или операторные схемы.

Рассмотрим подэтапы второго этапа моделирования.

1.12. Построение логической схемы модели. Рекомендуется использовать блочный принцип со всеми его особенностями, описанными ранее.

1.13. Получение математических соотношений. Схема машинной модели должна представлять собой полное отражение заложенной в модели концепции и иметь: описание всех блоков модели с их наименованиями; единую систему обозначений и нумерацию блоков; отражение логики процесса функционирования системы; задание математических соотношений в явном виде.

1.14. Проверка достоверности модели. Является первой из ряда проверок, выполняемых на этапе реализации модели, дающей ответ на вопросы: возможности решения поставленной задачи; точности отражения замысла в логической схеме; полноте логической схемы модели; правильности используемых математических соотношений.

1.15. Выбор инструментальных средств для моделирования. Сводится к обеспечению следующих условий: наличия необходимых программных и технических средств; доступности выбранной ЭВМ для разработчика модели; обеспечения всех этапов реализации модели; возможности своевременного получения результатов.

1.16. Составление плана работ по программированию. План должен включать: выбор языка программирования; указание типа ЭВМ и необходимых для моделирования устройств; оценку примерного объема необходимой оперативной и внешней памяти; предполагаемые затраты на программирование и отладку программы.

1.17. Спецификация и построение схемы программы. Схема должна отражать: разбиение модели на блоки и подблоки; особенности программирования модели; проведение необходимых изменений; возможности тестирования программы; оценку затрат машинного времени; форму представления входных и выходных данных.

1.18.Верификация и проверка достоверности программы. Верификация программы – доказательство того, что поведение программы соответствует ее спецификации. При этом проводится проверка соответствия каждой операции, представленной в схеме программы, аналогичной ей операции в логической схеме модели.

1.19.Проведение программирования модели. Проводится непосредственная генерация рабочих программ для моделирования конкретного объекта.

1.20.Проверка достоверности программы. Является последней из ряда проверок реализации модели, которую необходимо проводить: обратным переводом программы в исходную схему; проверкой отдельных частей программы при решении различных тестовых задач; объединением всех частей программы и проверкой ее в целом на контрольном примере моделирования варианта системы.

1.21.Составление технической документации по второму этапу. Техническая включает в себя: логическую схему модели и ее описание; адекватную схему программы и принятые обозначения; полный текст программы; перечень входных и выходных величин с пояснениями; инструкцию по работе с программой; оценку затрат машинного времени на моделирование с указанием требуемых ресурсов ЭВМ.

### ***Получение и интерпретация результатов моделирования систем***

На данном заключительном этапе моделирования ЭВМ используется для проведения рабочих расчетов по составленной и отлаженной программе, результаты которых позволяют проанализировать и сформулировать выводы о характеристиках процесса функционирования моделируемой системы.

Включает в себя следующие подэтапы.

3.1. Планирование машинного эксперимента с моделью системы. Планирование призвано дать в итоге максимальный объем необходимой информации при минимальных затратах машинных ресурсов. Различают стратегическое и тактическое планирование. При стратегическом планировании ставится задача построения оптимального плана вычислительного эксперимента для достижения конечной цели моделирования. Тактическое планирование преследует частные цели оптимальной реализации каждого конкретного эксперимента из всего множества необходимых. Для решения задач планирования целесообразно использование статистических методов.

3.2. Определение требований к вычислительным средствам. Составляется график работы на одной или нескольких ЭВМ с указанием загрузки необходимых периферийных устройств. При этом целесообразно оценить возможность использования ПЭВМ или ЛВС.

3.3. Проведение рабочих расчетов. Рабочие расчеты обычно включают: подготовку наборов исходных данных для ввода в ЭВМ; проверку исходных

данных, подготовленных для ввода; проведение расчетов непосредственно на ЭВМ; получение выходных данных, т.е. результатов моделирования.

3.4. Анализ результатов моделирования системы. Вычисление статистических характеристик результатов моделирования перед их выводом повышает эффективность использования ЭВМ и сводит к минимуму обработку выходной информации.

3.5. Представление результатов моделирования. При диалоговых режимах моделирования наиболее рациональными средствами оперативного отражения его результатов являются средства технологии мультимедиа.

3.6. Интерпретация результатов моделирования. Подразумевается переход от информации, полученной в результате машинного эксперимента с моделью к информации применительно к объекту моделирования.

3.7. Подведение итогов моделирования и выдача рекомендаций. При подведении итогов должны быть отмечены главные особенности, полученные в соответствии с планом эксперимента над моделью, проведена проверка правильности использованных гипотез и предположений. Все это позволяет сформулировать рекомендации по практическому использованию результатов моделирования на этапе проектирования реальной системы.

3.8. Составление технической документации по третьему этапу. Документация включает в себя: план проведения машинного эксперимента; наборы исходных данных для моделирования; результаты моделирования; анализ и оценку результатов моделирования; выводы по полученным результатам моделирования; указание путей дальнейшего совершенствования машинной модели и возможных областей ее применения.

***—Лекция 10—***

***Лекция 9.***

***Тема 4.* Статистическое моделирование систем на ЭВМ**

—— В практике моделирования систем информатики наиболее часто приходится иметь дело с объектами, которые в процессе своего функционирования содержат элементы стохастичности или подвергаются случайным воздействиям внешней среды. Поэтому основным методом получения результатов с помощью имитационных моделей таких стохастических систем является метод статистического моделирования на ЭВМ, использующий в качестве теоретической базы предельные теоремы теории вероятности. Возможность получения пользователем модели результатов статистического моделирования сложных систем в условиях ограниченности машинных ресурсов существенно зависит от эффективности процедур генерации псевдослучайных последовательностей на ЭВМ, положенных в основу имитации воздействия на элементы моделируемой системы.

## ***Общая характеристика метода статистического моделирования***

Сущность метода статистического моделирования сводится к построению для процесса функционирования исследуемой системы некоторого моделирующего алгоритма, имитирующего поведение и взаимодействие элементов системы с учетом случайных входных воздействий и воздействий внешней среды, а также реализации этого алгоритма с использованием программно-технических средств ЭВМ. Различают две области применения данного метода: 1) для изучения стохастических систем; 2) для решения детерминированных задач. Основной идеей решения детерминированных задач методом статистического моделирования, является замена детерминированной задачи эквивалентной схемой некоторой стохастической системы, выходные данные которой совпадают с результатом решения исходной задачи. Естественно, что при такой замене вместо точного решения имеет место, приближенное решение, погрешность которого уменьшается с увеличением числа испытаний (реализаций моделирующего алгоритма).

В результате статистического моделирования системы получается серия частных значений искомых величин или функций, статистическая обработка которых позволяет получить сведения о поведении реального объекта или процесса в произвольные моменты времени. Если количество реализаций достаточно велико, то полученные результаты моделирования системы приобретают статистическую устойчивость и с достаточной точностью могут быть приняты в качестве оценок искомых характеристик функционирования системы.

Теоретической основой метода статистического моделирования систем на ЭВМ являются предельные теоремы теории вероятностей: неравенство Чебышева; теорема Бернулли; теорема Чебышева; обобщенная теорема Чебышева; теорема Маркова; центральная предельная теорема; теорема Лапласа (частный случай центральной предельной теоремы).

Множества случайных явлений (событий, величин), подчиняются определенным закономерностям, позволяющим не только прогнозировать их поведение, но и количественно оценивать некоторые их средние характеристики, проявляющие определенную устойчивость. характерные закономерности наблюдаются также в распределениях случайных величин, которые образуются при сложении множества воздействий. выражением этих закономерностей и устойчивости средних показателей являются так называемые предельные теоремы теории вероятностей, принципиальное значение которых состоит в том, что они гарантируют высокое качество статистических оценок при весьма большом числе испытаний. При использовании ЭВМ, практически приемлемые при статистическом моделировании количественные оценки характеристик систем часто могут быть получены уже при сравнительно небольших числах реализаций системы.

## *Псевдослучайные последовательности и процедуры их машинной генерации*

При статистическом моделировании систем одним из основных вопросов является учет стохастических воздействий. Количество случайных чисел, используемых для получения статически устойчивой оценки процесса функционирования системы при реализации моделирующего алгоритма на ЭВМ, колеблется в достаточно широких пределах в зависимости от класса объекта моделирования, вида оцениваемых характеристик, необходимой точности и достоверности результатов моделирования. Для метода статистического моделирования на ЭВМ характерно, что большое число операций, а соответственно и большая доля машинного времени расходуется на действия со случайными числами. Кроме того, результаты статистического моделирования существенно зависят от качества исходных (базовых) последовательностей случайных чисел. Поэтому наличие простых и экономичных способов формирования последовательностей случайных чисел требуемого качества во многом определяет возможность практического использования машинного моделирования систем. На практике реализуются три основных способа генерации случайных чисел: аппаратный (физический); табличный (файловый) и алгоритмический (программный).

При аппаратном способе генерации случайные последовательности вырабатываются специальной электронной приставкой – генератором (датчиком) случайных чисел, – служащей в качестве одного из периферийных устройств ЭВМ. Таким образом, реализация этого способа не требует дополнительных вычислительных операций ЭВМ по выработке случайных чисел, а необходима только операция обращения к данному устройству. В качестве физического эффекта, лежащего в основе таких генераторов случайных чисел, чаще всего используются шумы в электронных и полупроводниковых приборах, явления полураспада радиоактивных элементов и т.д.

Если случайные числа, оформленные в виде таблицы, помещать во внешнюю или оперативную память ЭВМ, предварительно сформировав из них соответствующий файл (массив), то такой способ получения случайных чисел будет называться табличным. Однако этот способ при моделировании систем на ЭВМ обычно оказывается рациональным использовать при сравнительно небольшом объеме таблицы и соответственно массива чисел, т.е. тогда, когда для его хранения можно применять оперативную память машины. Хранение подобного файла во внешней памяти при частом обращении к нему в процессе статистического моделирования не рационально, т.к. оно вызывает увеличение затрат машинного времени при моделировании системы за счет необходимости обращения к внешнему накопителю. Возможны промежуточные способы организации файла, если он

периодически переписывается по частям в оперативную память. Такой подход уменьшает время на обращение к внешней памяти, но сокращает объем оперативной памяти, который можно использовать для моделирования процесса функционирования системы.

Алгоритмический способ получения последовательности случайных чисел основан на их формировании непосредственно в ЭВМ с помощью специальных алгоритмов и реализующих их программ. При этом каждое случайное число вычисляется с помощью соответствующей процедуры по мере возникновения потребностей при моделировании системы на ЭВМ.

Для сравнения рассмотрим совместно достоинства и недостатки всех трех перечисленных способов генерации последовательностей случайных чисел.

Способ	Достоинства	Недостатки
Аппаратный	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Запас чисел не ограничен</li> <li>• Расходуется минимум оперативной памяти ЭВМ</li> <li>• Не используется внешняя память ЭВМ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Требуется периодическая проверка</li> <li>• Невозможно воспроизведение последовательностей</li> <li>• Используется специальное внешнее устройство</li> <li>• Необходимы меры по обеспечению стабильности</li> </ul>
Табличный	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Требуется однократная проверка</li> <li>• Возможно воспроизведение последовательностей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Запас чисел ограничен</li> <li>• Используется много места в оперативной памяти или необходимо время на обращение к внешней памяти</li> </ul>
Алгоритмический	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Требуется однократная проверка</li> <li>• Возможно многократное воспроизведение последовательностей случайных чисел</li> <li>• Занимает мало место в памяти ЭВМ</li> <li>• Не используются внешние устройства</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Запас чисел последовательности ограничен ее периодом</li> <li>• Существенные затраты машинного времени</li> </ul>

Из таблицы видно, что для практического моделирования систем на универсальных ЭВМ наиболее рационален алгоритмический способ генерации последовательностей случайных чисел.

## ~~Лекция 11~~

### Лекция 11.

#### ***Процедуры генерации последовательностей псевдослучайных чисел***

Одной из исторически первых процедур получения последовательностей псевдослучайных чисел была процедура, получившая название метода серединных квадратов. Пусть имеется  $2n$ -разрядное число, меньшее единицы:  $x_i = 0, a_1 a_2 \dots a_{2n}$ . Возведем его в квадрат:  $x_i^2 = 0, b_1 b_2 \dots b_{4n}$ , а затем отберем средние  $2n$  разрядов  $x_{i+1} = 0, b_{n+1} b_{n+2} \dots b_{3n}$ , которые и будут являться очередным числом псевдослучайной последовательности. Недостаток данного метода – наличие корреляции между числами последовательности, а в ряде случаев случайность может вообще отсутствовать.

Широкое применение при моделировании систем на ЭВМ получили конгруэнтные процедуры генерации псевдослучайных последовательностей, представляющие собой арифметические операции, в основе которых лежит понятие конгруэнтности. Два целых числа  $a$  и  $b$  конгруэнтны (сравнимы) по модулю  $m$ , где  $m$  – целое число, тогда и только тогда, когда существует такое целое число  $k$ , что  $a - b = km$ , т.е. если разность чисел  $a$  и  $b$  делится на  $m$  и если числа  $a$  и  $b$  дают одинаковые остатки от деления на абсолютную величину числа  $m$ . Конгруэнтные процедуры являются чисто детерминированными, т.к. описываются в виде рекуррентного соотношения:

$$X_i = \lambda^i X_0 + (\lambda^i - 1) \mu / (\lambda - 1) \pmod{M},$$

где  $X_i$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $M$  – неотрицательные целые числа. Если заданы начальное значение  $X_0$ , множитель  $\lambda$  и аддитивная константа  $\mu$ , то данное соотношение однозначно определяет последовательность целых чисел  $\{X_i\}$ , составленную из остатков деления на  $M$  членов последовательности  $\{\lambda^i X_0 + (\lambda^i - 1) \mu / (\lambda - 1)\}$ . Таким образом, по целым числам последовательности  $\{X_i\}$  можно построить последовательность  $\{x_i\} = \{X_i / M\}$  рациональных чисел из интервала  $(0, 1)$ .

#### ***Проверка качества последовательностей псевдослучайных чисел***

Эффективность статистического моделирования на ЭВМ и достоверность получаемых результатов существенным образом зависят от качества исходных (базовых) последовательностей псевдослучайных чисел, которые являются основой для получения стохастических воздействий на



элементы моделируемой системы. Прежде чем приступать к реализации моделирующих алгоритмов на ЭВМ, необходимо убедиться в том, что исходная последовательность псевдослучайных чисел удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям, т.к. в противном случае даже при наличии абсолютно правильного алгоритма моделирования процесса функционирования системы по результатам моделирования нельзя достоверно судить о ее характеристиках. Поэтому, все применяемые генераторы случайных чисел должны пройти тщательное тестирование перед моделированием системы. Тестирование представляет собой комплекс проверок по различным статистическим критериям, включая в качестве основных тесты на равномерность, стохастичность и независимость.

Проверка равномерности последовательности псевдослучайных квазиравномерно распределенных чисел может быть выполнена по ее гистограмме с использованием косвенных признаков. Суть проверки по гистограмме сводится к следующему: выдвигается гипотеза о равномерности распределения чисел в интервале  $(0, 1)$ , который затем разбивается на  $m$  равных частей. Тогда при генерации последовательности  $\{x_i\}$  каждое из чисел  $x$  с вероятностью  $p_j=1/m$  попадает в один из подынтервалов. Очевидно, что если числа  $x_i$  принадлежат псевдослучайной квазиравномерно распределенной последовательности, то при достаточно больших значениях числа испытаний  $N$  экспериментальная гистограмма приблизится к теоретической прямой  $1/m$ . Оценка степени приближения, т.е. равномерности последовательности  $\{x_i\}$ , может быть проведена с использованием критериев согласия. На практике обычно принимается  $m=20\div 50$ ,  $N=(10^2\div 10^3)$ .

Проверка стохастичности последовательности псевдослучайных чисел  $\{x_i\}$  наиболее часто проводится методами комбинаций и серий. Сущность метода комбинаций сводится к определению закона распределения длин участков между единицами (нулями) или закона распределения (появления) числа единиц (нулей) в  $n$ -разрядном двоичном числе  $X_i$ . На практике длину последовательности  $N$  берут достаточно большой и проверяют все  $n$  разрядов или только  $l$  старших разрядов. Теоретически вероятность появления  $j$  единиц в  $l$  разрядах  $P(j, l)$  двоичного числа  $X_i$  описывается биномиальным законом распределения, исходя из независимости отдельных разрядов. После нахождения теоретических и экспериментальных вероятностей  $P(j, l)$  гипотеза о стохастичности проверяется с использованием критериев согласия.

Проверка независимости элементов последовательности псевдослучайных квазиравномерно распределенных чисел проводится на основе вычисления корреляционного момента.

### ***Моделирование случайных воздействий на системы***

При моделировании системы методами имитационного моделирования, в частности методом статистического моделирования на ЭВМ, существенное внимание уделяется учету случайных факторов и воздействий на систему. Для их формализации используются случайные события, дискретные и непрерывные величины, векторы, процессы. Формирование на ЭВМ реализаций случайных объектов любой природы из перечисленных сводится к генерации и преобразование последовательностей случайных чисел. Рассмотрим вопросы преобразования последовательности псевдослучайных чисел  $\{x_i\}$  в последовательность  $\{y_i\}$  для имитации воздействий на моделируемую систему.

Простейшими случайными объектами при статистическом моделировании систем являются случайные события. В основе их моделирования лежит реализация случайного события, наступающего с заданной вероятностью  $p$ . Процедура моделирования состоит в выборе значений  $x_i$  и сравнении их с  $p$ . При этом, если выполняется условие  $x_i \leq p$ , исходом испытания является событие  $A$ .

Для получения дискретных случайных величин можно использовать метод обратной функции. Непрерывная случайная величина задается некоторой интегральной функцией распределения. Для получения непрерывных случайных величин с заданным законом распределения, также можно использовать метод обратной функции.

Вектор случайных величин, обладающих заданными вероятностными характеристиками, можно задать проекциями на оси координат, причем эти проекции являются случайными величинами, описываемыми совместным законом распределения. В простейшем случае, когда рассматриваемый случайный вектор расположен на плоскости  $xOy$ , он может быть задан совместным законом распределения его проекций на оси  $Ox$  и  $Oy$ .

***-Лекция 12-***

## **Тема 5- Инструментальные средства моделирования систем**

Успешность поведения имитационных экспериментов с моделями сложных систем существенным образом зависит от инструментальных средств, т.е. набора аппаратно-программных средств, представляемых пользователю-разработчику или пользователю-исследователю машинной модели. Большое значение при реализации модели на ЭВМ имеет вопрос выбора языка моделирования.

### ***Основы систематизации языков моделирования***

Алгоритмические языки при моделировании систем служат вспомогательным аппаратом разработки, машинной реализации и анализа характеристик моделей. Каждый язык моделирования должен отражать определенную структуру понятий для описания широкого класса явлений. Выбрав для решения задачи моделирования процесса функционирования системы конкретный язык, пользователь получает в распоряжение тщательно разработанную систему абстракций, предоставляющих ему основу для формализации процесса функционирования исследуемой системы. Высокий уровень проблемной ориентации языка моделирования значительно упрощает программирование моделей, а специально предусмотренные в нем возможности сбора, обработки и вывода результатов моделирования позволяют быстро и подробно анализировать возможные исходы имитационного эксперимента с моделью.

Язык программирования представляет собой набор символов, распознаваемых ЭВМ и обозначающих операции, которые можно реализовать на ЭВМ. На низшем уровне находится основной язык машины, программа на котором пишется в кодах, непосредственно соответствующих машинным действиям (сложение, запоминание, пересылка по указанному адресу и т.д.). Следующий уровень занимает автокод (язык АССЕМБЛЕРА) вычислительной машины. Программа на автокоде составляется из мнемонических символов, преобразуемых в машинные коды специальной программой – ассемблером.

Компилятором называется программа, распознающая инструкции, написанные на алгоритмическом языке высокого уровня, и преобразующих их в программы на основном языке машины или на автокоде, которые в последнем случае транслируются еще раз с помощью ассемблера. Интерпретатором называется программа, которая, принимая инструкции входного языка, сразу выполняет соответствующие операции в отличие от компилятора, преобразующего эти инструкции в запоминающиеся цепочки команд. Трансляция происходит в течении всего процесса работы программы, написанной на языке интерпретатора. В отличие от этого компиляция и ассемблирование представляют собой однократные акты перевода текста с входного языка на объектный язык машины, после чего полученные программы выполняются без повторных обращений к транслятору.

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

Большинство языков интерпретаторов и компиляторов можно классифицировать как процедурно-ориентированные языки, которые качественно отличаются от машинно-ориентированных языков,

описывающих элементарные действия на ЭВМ и не обладающих проблемной ориентацией. Все процедурно-ориентированные языки предназначены для конкретного класса задач, они включают в себя инструкции, удобные для формулировки способов решения типичных задач соответствующего класса, при этом необходимые алгоритмы формируются в обозначениях общего вида, т.е. не связанных напрямую ни с какой определенной ЭВМ.

Язык имитационного моделирования (ЯИМ) представляет собой процедурно-ориентированный язык, обладающий специфическими чертами. Основные языки моделирования разрабатывались в качестве программного обеспечения имитационного подхода к изучению процесса функционирования определенного класса систем. Целесообразность использования ЯИМ вытекает из двух основных причин: 1) удобство программирования модели системы; 2) концептуальная направленность используемого языка на класс исследуемых систем. Наиболее серьезные недостатки ЯИМ проявляются в том, что в отличие от языков общего назначения (ЯОН), трансляторы с которых включены в поставляемое изготовителем математическое обеспечение всех современных ЭВМ, языки моделирования, за редким исключением разрабатывались отдельными организациями для своих узко специализированных потребностей, т.е. их трансляторы плохо описаны и приспособлены для эксплуатации.

### ***Понятие пакета прикладных программ моделирования***

Создание проблемно-ориентированных комплексов, в том числе и автоматизированных систем моделирования (АСМ), называемых пакетами прикладных программ, является важным направлением в современной вычислительной математике. При создании пакетов прикладных программ моделирования (ППМ) помимо разработки, а также отбора моделирующих алгоритмов и программ существенное место занимают работы по созданию соответствующего системного обеспечения. Быстрота и удобство решения задач моделирования конкретных классов систем при использовании ППМ достигается сочетанием в единой архитектуре функционального наполнения, состоящего из модулей и покрывающего предметную область моделирования, со специализированными средствами системного обеспечения, позволяющими сравнительно легко реализовать различные задачи моделирования и проведения машинных экспериментов с моделью системы и обеспечить пользователя разнообразным сервисом при их подготовке.

Функциональное наполнение ППМ отражает специфику предметной области применительно к конкретному объекту моделирования, т.е. исследуемой системе, и представляет собой совокупность модулей. Под модулем понимается конструктивный элемент, используемый на различных стадиях функционирования пакета. Язык, на котором записываются модули функционального наполнения, называется базовым языком ППМ. Состав

функционального наполнения пакета, его мощность или полнота охвата предметной области отражают объем прикладных знаний, заложенных в ППМ, т.е. потенциальный уровень тематической квалификации пакета.

Одной из ключевых проблем разработки ППМ является модуляризация, т.е. разбиение функционального наполнения пакета на модули. Тщательно выполненный анализ объекта моделирования и проведенная на его основе модуляризация позволяют сократить объем работ по реализации ППМ, повышают его надежность и облегчают дальнейшую эволюцию пакета. Под конструктивностью модуля понимается его алгоритмическая совместимость (составимость), т.к. модуль представляет собой элемент алгоритмического базиса, служащего для построения программ моделирования. Число разнообразных форм модулей, используемых в пакетах, чрезвычайно велико. Прежде всего, следует выделить программные модули, модули данных и модули документации. Для программных модулей известны, например, такие формы, как подпрограмма; конструкция алгоритмического языка, допускающая автономную трансляцию; файл, содержащий текст программы, рассматриваемый как самостоятельный объект для изучения или редактирования; набор указаний, определяющих способ построения конкретной версии программы; реализация абстрактного типа данных и др.

Системное наполнение ППМ представляет собой совокупность программ, которые обеспечивают выполнение заданий и взаимодействие пользователя с пакетом, адекватное дисциплине работы в рассматриваемой прикладной деятельности. Можно сказать, что системное наполнение организует использование потенциала знаний, заложенных в функциональном наполнении, в соответствии с возможностями, предусмотренными в языке заданий ППМ.

Структурно АСМ можно разбить на следующие комплексы программ (подпрограммы): формирования базы данных об объекте моделирования; формирования базы данных о машинном эксперименте; моделирования процесса функционирования объекта; организации различных режимов работы ППМ.

## 7. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### ~~ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1~~ Лабораторная работа № 1

**Тема.** Моделирование временных характеристик динамической системы с прямыми связями (2 часа)

#### ***Вопросы текущего контроля знаний***

1. Дайте определение передаточной функции.

2. Поясните назначение элементов структурных схем: функционального блока; узла; сумматора.

## Исходные данные

Замкнутая линейная динамическая система, состоящая из двух параллельных колебательных звеньев, описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} + 2b_1 \frac{dy_1(t)}{dt} + \omega_{01}^2 y_1(t) = k_1 v(t);$$

$$\frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + 2b_2 \frac{dy_2(t)}{dt} + \omega_{02}^2 y_2(t) = k_2 v(t);$$

$$y(t) = K \sum_{i=1}^2 y_i(t),$$

где  $y_i(t)$  – выходные временные характеристики звеньев системы;  $b_i$  и  $\omega_{0i}$  – соответственно, коэффициенты затухания и частоты их собственных колебаний;  $k_i$  – некоторые параметры соответствующих звеньев;  $v(t)$  – функция внешнего воздействия;  $y(t)$  – результирующая выходная характеристика системы;  $K$  – коэффициент связи.

Математическая модель рассматриваемой системы, представленная в типовой форме записи через передаточные функции, имеет вид:

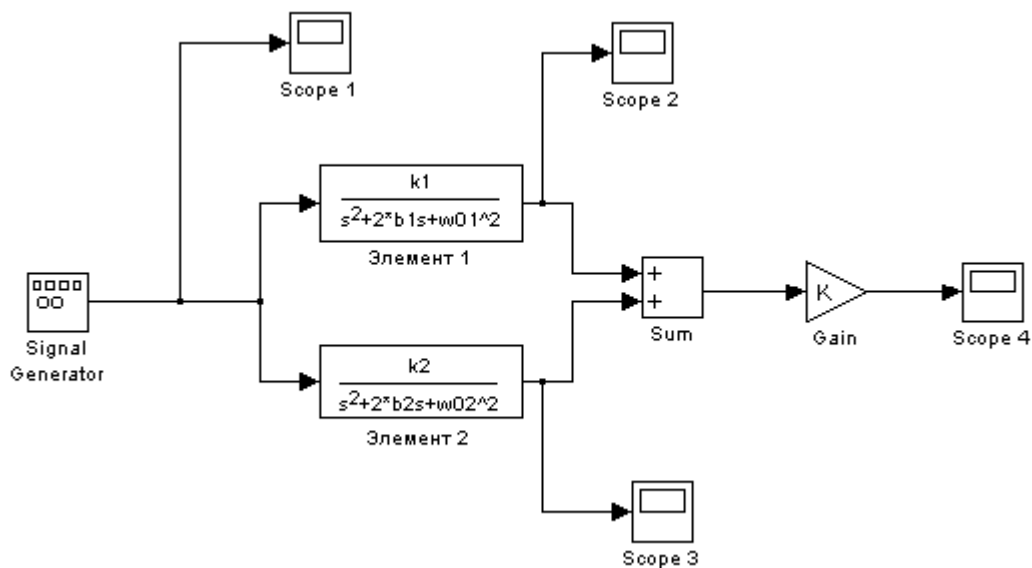
$$y_1(s) = W_1(s)v(s), \quad W_1(s) = \frac{k_1}{s^2 + 2b_1s + \omega_{01}^2};$$

$$y_2(s) = W_2(s)v(s), \quad W_2(s) = \frac{k_2}{s^2 + 2b_2s + \omega_{02}^2};$$

$$y(s) = v(s)K \sum_{i=1}^2 W_i(s),$$

где  $W_i(s)$  – передаточные функции соответствующих процессов.

Таким образом, для моделирования временных характеристик рассматриваемой системы можно использовать *simulink*-схему, представленную ниже.



## Индивидуальные варианты заданий

$N_{\text{о}}$ $n/$ $n$	$k_1$	$b_1$	$\omega_{01}$	$k_2$	$b_2$	$\omega_{02}$	$K$
<b>1</b>	100	1	10	150	2	5	0,4
<b>2</b>	110	2	11	140	3	6	0,5
<b>3</b>	120	3	12	130	4	7	0,6
<b>4</b>	130	4	13	120	5	8	0,7
<b>5</b>	140	5	14	110	6	9	0,8
<b>6</b>	150	6	15	100	7	8	0,9
<b>7</b>	160	7	16	110	8	7	1,0
<b>8</b>	170	6	17	120	9	6	1,1
<b>9</b>	180	5	18	130	8	5	1,2
<b>10</b>	190	4	19	140	7	4	1,3
<b>11</b>	200	3	20	150	6	3	1,4
<b>12</b>	210	2	21	160	5	2	1,5

### Задание 1

Используя демонстрационные возможности *MatLAB*, просмотрите примеры построения и применения *simulink*-схем.

### Задание 2

Создайте *simulink*-схему, согласно индивидуальным вариантам заданий, и получите временные характеристики:  $v(t)$  – входного синусоидального сигнала с единичной амплитудой и частотой 20 рад/с;  $y_i(t)$  – выходов элементов системы;  $y(t)$  – результирующего выхода системы.

Примечание. Электронный отчет, выполняемый в формате *Microsoft Word*, должен включать в себя ответы на контрольные вопросы, подробное описание программной

реализации каждого пункта выполнения лабораторной работы, а так же отражать результаты моделирования в соответствии с вариантами индивидуальных заданий.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 Лабораторная работа №2

**Тема.** Моделирование временных характеристик динамической системы с обратной связью (2 часа)

### **Вопросы текущего контроля знаний**

1. Раскройте понятие обратной связи.
2. Дайте определение передаточной функции системы по расогласованию.

### **Исходные данные**

Замкнутая линейная динамическая система с отрицательной обратной связью, состоящая из двух параллельных колебательных звеньев, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} + 2b_1 \frac{dy_1(t)}{dt} + \omega_{01}^2 y_1(t) &= k_1 x(t); \\ \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + 2b_2 \frac{dy_2(t)}{dt} + \omega_{02}^2 y_2(t) &= k_2 x(t); \\ x(t) &= v(t) - K \sum_{i=1}^2 y_i(t), \end{aligned}$$

где  $y_i(t)$  – выходные временные характеристики звеньев системы;  $b_i$  и  $\omega_{0i}$  – соответственно, коэффициенты затухания и частоты их собственных колебаний;  $k_i$  – некоторые параметры звеньев;  $x(t)$  – совокупность входных воздействий;  $v(t)$  – функция внешнего воздействия;  $K$  – коэффициент обратной связи.

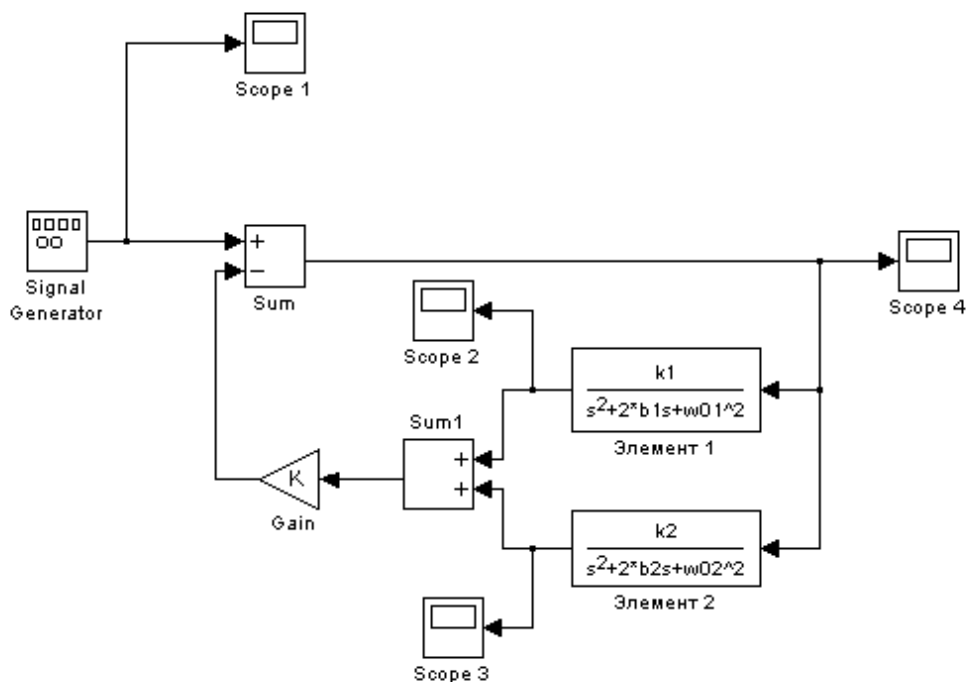
Математическая модель рассматриваемой системы, представленная в типовой форме записи через передаточные функции, имеет вид:

$$\begin{aligned} y_1(s) &= W_1(s)x(s), \quad W_1(s) = \frac{k_1}{s^2 + 2b_1s + \omega_{01}^2}; \\ y_2(s) &= W_2(s)x(s), \quad W_2(s) = \frac{k_2}{s^2 + 2b_2s + \omega_{02}^2}; \\ x(s) &= v(s) - x(s)K \sum_{i=1}^2 W_i(s), \end{aligned}$$

где  $W_i(s)$  – передаточные функции соответствующих процессов.

Таким образом, для моделирования временных характеристик рассматриваемой системы можно использовать *simulink*-схему, представленную ниже.





### Задание 1

Создайте *simulink*-схему, согласно индивидуальным вариантам заданий лабораторной работы № 1. При формировании схемы для форматирования ее элементов используйте контекстные меню, вызываемые правой клавишей мыши. Получите временные характеристики:  $v(t)$  – входного синусоидального сигнала с единичной амплитудой и частотой 50 рад/с;  $y_1(t)$  – выходов элементов системы;  $y(t)$  – результирующего выхода системы. Приведите сетки полученных графических окон к единому виду.

### Задание 2

Получите рассматриваемые временные характеристики для входного синусоидального сигнала с единичной амплитудой и частотой 5 рад/с. Поясните качественное различие амплитуд результирующих выходов системы в первом и втором случаях.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 Лабораторная работа №3

**Тема.** Моделирование временных характеристик динамической системы с перекрестными обратными связями (2 часа)

### *Вопросы текущего контроля знаний*

1. Поясните принципиальные отличия классического и системного подходов.
2. Раскройте понятие перекрестной связи.

## Исходные данные

Замкнутая линейная динамическая система с перекрестными обратными связями, состоящая из двух параллельных колебательных звеньев, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} + \omega_{01}^2 [y_1(t) + y_2(t)] &= k_1 v(t); \\ \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + \omega_{02}^2 [y_2(t) + y_1(t)] &= k_2 v(t); \\ y(t) &= \sum_{i=1}^2 y_i(t),\end{aligned}$$

где  $y_i(t)$  – выходные временные характеристики звеньев системы;  $\omega_{0i}$  – частоты их собственных колебаний;  $k_i$  – некоторые параметры звеньев;  $v(t)$  – функция внешнего воздействия;  $y(t)$  – результирующий выход системы.

Математическая модель рассматриваемой системы, представленная в типовой форме записи через передаточные функции, имеет вид:

$$\begin{aligned}y_1(s) &= \frac{k_1}{s^2 + \omega_{01}^2} \left( v(s) - \frac{\omega_{01}^2}{k_1} y_2(s) \right) \\ y_2(s) &= \frac{k_2}{s^2 + \omega_{02}^2} \left( v(s) - \frac{\omega_{02}^2}{k_2} y_1(s) \right) \\ y(s) &= \sum_{i=1}^2 y_i(s),\end{aligned}$$

где  $y_i(s)$ ,  $v(s)$  и  $y(s)$  – изображения по Лапласу функций  $y_i(t)$ ,  $v(t)$  и  $y(t)$ .

Таким образом, для моделирования временных характеристик рассматриваемой системы можно использовать *simulink*-схему, представленную ниже.

## ~~ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4~~ Лабораторная работа №4

**Тема.** Комплексное моделирование характеристик динамической системы с прямыми связями (2 часа)

### Вопросы текущего контроля знаний

1. Раскройте понятие «математическое моделирование».
2. Поясните сущности вещественной и мнимой частотных характеристик системы.

## Исходные данные

Математическая модель замкнутой линейной динамической системы, состоящей из двух параллельных колебательных звеньев, представленная в типовой форме записи через передаточные функции, имеет вид:

$$y_1(s) = W_1(s)v(s), \quad W_1(s) = \frac{k_1}{s^2 + 2b_1s + \omega_{01}^2};$$

$$y_2(s) = W_2(s)v(s), \quad W_2(s) = \frac{k_2}{s^2 + 2b_2s + \omega_{02}^2};$$

$$y(s) = v(s)K \sum_{i=1}^2 W_i(s),$$

где  $y_i(s)$  – изображения выходных характеристик звеньев системы;  $W_i(s)$  – передаточные функции соответствующих процессов;  $v(s)$  – изображение функции внешнего воздействия;  $b_i$  и  $\omega_{0i}$  – коэффициенты затухания и частоты собственных колебаний соответствующих звеньев;  $k_i$  – их некоторые параметры;  $y(s)$  – изображение выходной характеристики системы;  $K$  – коэффициент связи.

### Задание 1

На основании Вашего индивидуального варианта задания сформируйте описания передаточных функций для каждого из отдельных звеньев системы в виде векторов коэффициентов полиномов, описывающих соответствующие числители  $num1$ ,  $num2$  и знаменатели  $den1$ ,  $den2$ . Используя функцию `parallel(num1, den1, num2, den2)` получите результирующую передаточную функцию исследуемой системы.

### Задание 2

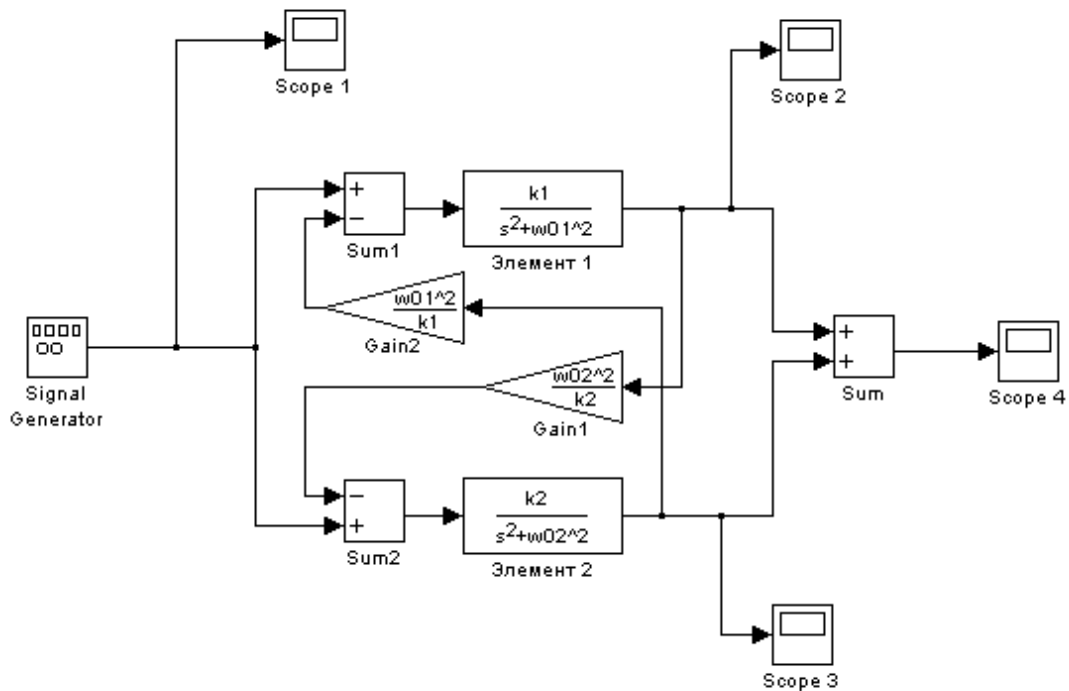
С помощью функции `lsim(num, den, v, T)` рассчитайте временную характеристику результирующего выхода системы для входного синусоидального сигнала с единичной амплитудой и частотой 20 рад/с.

### Задание 3

Используя функцию `nyquist(num, den, w)`, рассчитайте вещественную и мнимую частотные характеристики системы для диапазона  $w$  от 0 до 50 рад/с.

### Задание 4

Осуществите совместный вывод следующих графиков: временной характеристики внешнего воздействия; временной характеристики результирующего выходного сигнала; вещественной и мнимой частотных характеристик системы.



### Задание

Создайте *simulink*-схему, согласно индивидуальным вариантам заданий лабораторной работы № 1. Получите временные характеристики:  $v(t)$  – входного синусоидального сигнала с единичной амплитудой и частотой 50 рад/с;  $y_i(t)$  – выходов элементов системы;  $y(t)$  – результирующего выхода системы. Приведите сетки графических окон к единым видам, соответственно, в необходимом масштабе для характеристик  $v(t)$  и  $y(t)$ , и в другом масштабе для  $y_i(t)$ . Проанализируйте полученные результаты.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 Лабораторная работа №5

**Тема.** Комплексное моделирование характеристик динамической системы с обратной связью (2 часа)

### *Вопросы текущего контроля знаний*

1. Перечислите основные подходы построения математических моделей процессов функционирования систем.
2. Поясните сущности амплитудной и фазовой частотных характеристик системы.

### Исходные данные

Математическая модель замкнутой линейной динамической системы с отрицательной обратной связью, состоящей из двух параллельных колебательных звеньев, представленная в типовой форме записи через передаточные функции, имеет вид:

$$y_1(s) = W_1(s)x(s), \quad W_1(s) = \frac{k_1}{s^2 + 2b_1s + \omega_{01}^2};$$

$$y_2(s) = W_2(s)x(s), \quad W_2(s) = \frac{k_2}{s^2 + 2b_2s + \omega_{02}^2};$$

$$x(s) = W_\varepsilon(s)v(s), \quad W_\varepsilon(s) = \frac{1}{1 + K \sum_{i=1}^2 W_i(s)},$$

где  $y_i(s)$  – изображения выходов звеньев системы;  $W_i(s)$  – передаточные функции соответствующих процессов;  $v(s)$  – изображение функции внешнего воздействия;  $b_i$  и  $\omega_{0i}$  – коэффициенты затухания и частоты собственных колебаний соответствующих звеньев;  $k_i$  – их некоторые параметры;  $x(s)$  – изображение выходной характеристики системы;  $K$  – коэффициент обратной связи;  $W_\varepsilon(s)$  – передаточная функция по рассогласованию.

### Задание 1

На основании Вашего индивидуального варианта задания сформируйте описания передаточных функций для каждого из отдельных звеньев системы в виде векторов коэффициентов полиномов, описывающих соответствующие числители  $num1$ ,  $num2$  и знаменатели  $den1$ ,  $den2$ . Используя функцию `parallel(num1, den1, num2, den2)` получите передаточную функцию для обратного канала исследуемой системы.

### Задание 2

С помощью функции `feedback(num_ПК, den_ПК, num_ОК, den_ОК, ±K_ОС)` сформируйте передаточную функцию по рассогласованию входа и выхода моделируемой системы.

### Задание 3

Используя функцию `bode(num, den, w)`, рассчитайте амплитудную и фазовую частотные характеристики системы для диапазона  $w$  от 0 до 50 рад/с.

### Задание 4

С помощью функции `lsim(num, den, v, T)` рассчитайте временную характеристику результирующего выхода системы для входного синусоидального сигнала с единичной амплитудой и частотой 20 рад/с.

### Задание 5

На основании векторов  $v(t)$  и  $x(t)$ , рассчитайте вектор величины рассогласования входа и выхода моделируемой системы  $\varepsilon(t) = x(t)/v(t)$ . Найдите значение амплитудной частотной характеристики –  $A$  для заданной частоты входного сигнала.

### Задание 6

Осуществите совместный вывод следующих графиков: АЧХ и ФЧХ системы; характеристики  $\varepsilon(t)$  с наложением на нее прямой линии  $y = A$ . Поясните результаты моделирования.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА** Лабораторная работа № 6  
**Тема.** Комплексное моделирование характеристик динамической системы с перекрестными обратными связями (2 часа)

**Вопросы текущего контроля знаний**

1. Раскройте понятие непрерывно-детерминированного подхода к моделированию системы на примере использования в качестве ее математической модели дифференциальных уравнений.
2. Поясните сущность метода нахождения явного вида передаточной функции способом введения промежуточной переменной.

**Исходные данные**

Математическая модель замкнутой линейной динамической системы с перекрестными обратными связями, состоящей из двух параллельных колебательных звеньев, представленная во второй типовой форме записи, имеет вид:

$$y_1(s) = \frac{k_1}{s^2 + \omega_{01}^2} \left( v(s) - \frac{\omega_{01}^2}{k_1} y_2(s) \right)$$

$$y_2(s) = \frac{k_2}{s^2 + \omega_{02}^2} \left( v(s) - \frac{\omega_{02}^2}{k_2} y_1(s) \right)$$

$$y(s) = \sum_{i=1}^2 y_i(s),$$

где  $y_i(s)$  – изображения выходов звеньев системы;  $v(s)$  – изображение функции внешнего воздействия;  $\omega_{0i}$  – частоты собственных колебаний соответствующих звеньев;  $k_i$  – их некоторые параметры;  $y(s)$  – изображение выходной характеристики системы.

**Задание 1**

Используя встроенное в *MatLAB* символьное ядро *Maple*, посредством ввода промежуточных переменных найдите явный вид передаточных функций для каждого из звеньев системы.

```
maple('sist:={w1=k1/(s^2+w01^2)*(1-w01^2/k1*w2),
w2=k2/(s^2+w02^2)*(1-w02^2/k2*w1)}:
solve(sist,{w1,w2});')
```

## Задание 2

На основании Вашего индивидуального варианта задания сформируйте описания передаточных функций для каждого из отдельных звеньев системы в виде векторов коэффициентов полиномов, описывающих соответствующие числители  $num1$ ,  $num2$  и знаменатели  $den1$ ,  $den2$ . Используя функцию  $parallel(num1, den1, num2, den2)$  получите передаточную функцию для обратного канала исследуемой системы.

## Задание 3

Используя функции  $nyquist$  и  $bode$ , рассчитайте вещественную и мнимую, а также амплитудную и фазовую частотные характеристики системы для диапазона  $\omega$  от 0 до 50 рад/с.

## Задание 4

С помощью функции  $lsim(num, den, v, T)$  рассчитайте временную характеристику результирующего выхода системы для входного синусоидального сигнала с единичной амплитудой и частотой 20 рад/с.

## Задание 5

Осуществите совместный вывод следующих графиков: временной характеристики внешнего воздействия; временной характеристики результирующего выходного сигнала; вещественной и мнимой частотных характеристик системы; амплитудной и фазовой частотных характеристик системы.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА** Лабораторная работа № 7

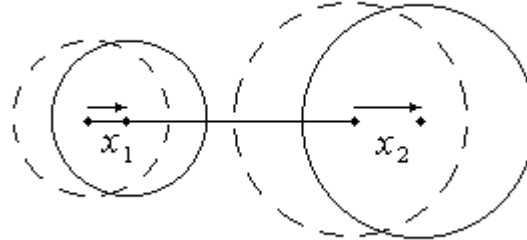
**Тема.** Визуализация динамики системы с прямыми связями (2 часа)

### **Вопросы текущего контроля знаний**

1. Дайте определения экзогенных и эндогенных параметров системы.
2. Поясните понятие имитационного моделирования.

## Исходные данные

*Объектом моделирования является визуализация процесса электронной поляризации двухатомной молекулы, происходящей под действием переменного электрического поля. Физическая сущность рассматриваемого явления заключается в смещениях электронных оболочек ионов относительно атомных ядер, механизм которых схематично отображен на рисунке.*



Упрощенная математическая модель электронной поляризации исследуемого объекта может быть описана следующей системой уравнений:

$$\frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + \omega_{01}^2 x_1(t) = E(t);$$
$$\frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} + \omega_{02}^2 x_2(t) = E(t),$$

где  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  – функции смещения центров электронных оболочек относительно атомных ядер;  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$  – частоты их собственных колебаний;  $E(t)$  – функция внешнего воздействия. Отметим, что приведенная модель может быть рассмотрена в качестве описания некоторой линейной динамической системы с прямыми связями.

### Задание 1

Представьте исходную систему уравнений во второй стандартной форме записи.

### Задание 2

С помощью операторов *lsim* рассчитайте временные характеристики функций  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  в диапазоне от 0 до 30 с., полагая  $\omega_{01}=5$  и  $\omega_{02}=2,5$  рад/с, для входного синусоидального сигнала с единичной амплитудой и частотой 0,5 рад/с.

### Задание 3

Реализуйте программу анимации рассматриваемого явления, используя значения радиусов электронных облаков  $r_1=5$  и  $r_2=10$ , а также расстояние между атомами, равное 15.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА** Лабораторная работа № 8

**Тема.** Визуализация динамики системы с различными видами связей (2 часа)

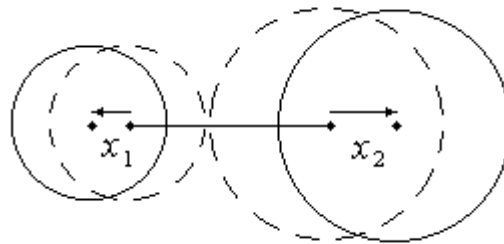


## Вопросы текущего контроля знаний

1. Приведите параметрическое уравнение окружности.
2. Раскройте принцип реализации метода прямой перерисовки анимационного изображения.

### Исходные данные

Объектом моделирования является визуализация процесса поляризации двухатомной молекулы, происходящей под действием переменного электрического поля. Физическая сущность рассматриваемого явления состоит из параллельно протекающих процессов электронной и ионной поляризации частиц, составляющих рассматриваемую систему. Механизм упругой ионной поляризации заключается в смещениях атомных ядер ионов относительно своих исходных состояний, при этом разнозаряженные частицы перемещаются в противоположных направлениях, см. схему на рисунке.



Упрощенная математическая модель ионной поляризации исследуемого объекта может быть описана следующей системой уравнений:

$$\frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + \omega_{01}^2 x_1(t) = E(t) - \omega_{01}^2 x_2(t);$$

$$\frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} + \omega_{02}^2 x_2(t) = E(t) - \omega_{02}^2 x_1(t),$$

где  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  – функции смещения атомных ядер ионов;  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$  – частоты их собственных колебаний;  $E(t)$  – функция внешнего воздействия. Отметим, что приведенная модель может быть рассмотрена в качестве описания некоторой линейной динамической системы с перекрестными связями.

### Задание 1

Используя потенциал нахождения символьного решения в пакете *MatLAB*, найдите явный вид передаточных функций для описания динамики элементов исследуемой системы.

### Задание 2

С помощью операторов *lsim* рассчитайте временные характеристики функций  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  в диапазоне от 0 до 50 с., полагая  $\omega_{01}=1$  и  $\omega_{02}=1$  рад/с, для входного синусоидального сигнала с единичной амплитудой и частотой 0,5 рад/с.

### Задание 3

Опираясь на результаты предыдущей лабораторной работы, рассчитайте временные характеристики процессов упругой электронной поляризации рассматриваемых частиц.

### Задание 4

Реализуйте программу анимации общей картины поляризационных явлений (как ионной, так и электронной поляризации каждого из элементов системы), используя значения радиусов электронных облаков  $r_1=5$  и  $r_2=10$ , а также расстояние между атомами, равное 15. При создании программной реализации необходимо учитывать, что отрицательный ион (большая окружность) начинает свое движение в направлении, которое совпадает со смещением электронных оболочек.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Лабораторная работа № 9 Сетевые модели (N-схемы). Сети Петри. (2 часа)

### *Вопросы текущего контроля знаний*

1. Поясните понятие сетевой модели
2. Дайте определение сети Петри (N-схемы).

### Теоретическая часть

#### **Понятие сети Петри**

Формально сеть Петри (N-схема) задается четверкой вида:

$$N = \langle B, D, I, O \rangle,$$

$B$  – конечное множество символов, называемых позициями;

$D$  – конечное множество символов, называемых переходами;

$I$  – входная функция (прямая функция инцидентности);

$O$  – выходная функция (обратная функция инцидентности).

Таким образом, входная функция  $I$  отображает переход  $d_j$  в множество выходных позиций  $b_i \in I(d_j)$ , а выходная функция  $O$  отображает переход  $d_j$  в множество выходных позиций  $b_i \in D(d_j)$ .

Графически N-схема изображается в виде двудольного ориентированного мультиграфа, представляющего собой совокупность позиций и переходов. Граф N-схемы имеет два типа узлов: позиции и переходы, изображаемые окружностями и планками соответственно. Ориентированные дуги соединяют позиции и переходы, причем каждая дуга направлена от элемента одного множества (позиции или перехода) к элементу другого множества (переходу или позиции).

Приведенное представление N-схемы может использоваться только для отражения статистики моделируемой системы (взаимосвязи событий и условий), но не позволяет отразить в модели динамику функционирования моделируемой системы. Для представления динамических свойств объекта вводится функция маркировки (разметки)

$M: B \rightarrow N$ . Маркировка  $M$  есть присвоение неких абстрактных объектов, называемых метками (фишками), позициям  $N$ -схемы, причем количество меток, соответствующее каждой позиции, может меняться в процессе функционирования сети. При графическом задании  $N$ -схемы разметка отображается помещением внутри вершин-позиций соответствующего числа точек (когда количество точек велико, ставят цифры).

Маркированная (размеченная)  $N$ -схема описывается в виде пятерки  $N_M = \langle B, D, I, O, M \rangle$  и является совокупностью сети Петри и функции маркировки  $M$ .

Функционирование  $N$ -схемы отражается путем перехода от разметки к разметке. Начальная разметка обозначается как  $M_0: B \rightarrow N$ . Смена разметок происходит в результате срабатывания одного из переходов  $d_j \in D$  сети. *Необходимым условием срабатывания перехода  $d_j$  является  $b_i \in I(d_j) \{M(b_i) \geq 1\}$ , где  $M(b_i)$  – разметка позиции  $b_i$ .* Переход  $d_j$ , для которого выполняется указанное условие, определяется как находящийся в состоянии готовности к срабатыванию или как возбужденный переход.

Срабатывание перехода  $d_j \in D$  изменяет разметку сети. Правило изменения разметки:

$$M_{k+1}(b) = M_k(b) - I(d_j) + O(d_j), \quad k=1, \infty, \quad (1)$$

где переход  $d_j \in D$  изымает по одной метке из каждой своей входной позиции и добавляет по одной метке в каждую из выходных позиций. Смена разметки обозначается как  $M_{k+1} \stackrel{d_j}{\leftarrow} M_k$ .

Для анализа функционирования сети Петри строится граф разметки. Граф разметки в качестве вершин содержит разметки, а дуги, соединяющие вершины в графе разметки помечаются теми переходами, срабатывание которых повлекло изменение разметки.

### ***Индивидуальные варианты заданий***

$N_0$	$B$	$D$	$I$	$O$	$M_0$
1	$\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$	$\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$	$I(d_1) = \{b_1, b_3\},$ $I(d_2) = \{b_2, b_3, b_5\},$ $I(d_3) = \{b_3\},$ $I(d_4) = \{b_4\}$	$O(d_1) = \{b_2, b_4\},$ $O(d_2) = \{b_2\},$ $O(d_3) = \emptyset,$ $O(d_4) = \{b_1\}$	2, 1, 3, 0, 2
2	$\{b_1, b_2, b_3, b_4\}$	$\{d_1, d_2, d_3\}$	$I(d_1) = \{b_2, b_4\},$ $I(d_2) = \{b_1, b_3, b_4\},$ $I(d_3) = \{b_1\},$	$O(d_1) = \{b_2, b_3\},$ $O(d_2) = \{b_3, b_4\},$ $O(d_3) = \{b_4\},$	3, 1, 2, 1
3	$\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$	$\{d_1, d_2, d_3\}$	$I(d_1) = \{b_1, b_3\},$ $I(d_2) = \{b_1, b_2\},$ $I(d_3) = \{b_3\}$	$O(d_1) = \{b_2, b_4\},$ $O(d_2) = \emptyset,$ $O(d_3) = \{b_5\},$	2, 1, 0, 0, 0
4	$\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$	$\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$	$I(d_1) = \{b_2, b_4\},$ $I(d_2) = \{b_1, b_3, b_5\},$ $I(d_3) = \{b_2, b_4\},$ $I(d_4) = \{b_1, b_2\}$	$O(d_1) = \{b_3, b_5\},$ $O(d_2) = \{b_2, b_4\},$ $O(d_3) = \{b_3, b_1\},$ $O(d_4) = \{b_4, b_5\}$	1, 1, 0, 1, 0
5	$\{b_1, b_2, b_3\}$	$\{d_1, d_2, d_3\}$	$I(d_1) = \{b_2, b_3\},$ $I(d_2) = \emptyset,$ $I(d_3) = \{b_1\}$	$O(d_1) = \{b_1, b_3\},$ $O(d_2) =$ $\{b_1, b_2, b_3\},$ $O(d_3) = \{b_2\},$	5, 0, 3
6	$\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$	$\{d_1, d_2, d_3\}$	$I(d_1) = \{b_1, b_5\},$ $I(d_2) = \{b_2, b_3\},$ $I(d_3) = \{b_1, b_2, b_3\}$	$O(d_1) = \{b_1, b_2\},$ $O(d_2) = \{b_4, b_5\},$ $O(d_3) = \{b_3, b_4,$ $b_5\}$	1, 0, 3, 1, 3
7	$\{b_1, b_2, b_3, b_4\}$	$\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$	$I(d_1) = \{b_1, b_3\},$ $I(d_2) = \{b_2, b_3, b_4\},$ $I(d_3) = \emptyset,$ $I(d_4) = \{b_3\}$	$O(d_1) = \emptyset,$ $O(d_2) =$ $\{b_1, b_3, b_4\},$ $O(d_3) = \emptyset,$ $O(d_4) = \{b_2\}$	1, 1, 1, 1

$$\begin{array}{ccccc}
8 & \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\} & \{d_1, d_2\} & I(d_1)=\{b_1, b_2, b_5\}, & O(d_1)=\{b_1, b_2\}, \\
& & & I(d_2)=\{b_1, b_3, b_5\} & O(d_2)=\{b_3\} \\
& & & & 1, \\
& & & & 0, \\
& & & & 1, \\
& & & & 0, \\
& & & & 1
\end{array}$$

	$B$	$D$	$I$	$O$	$M_0$
9	$\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$	$\{d_1, d_2, d_3\}$	$I(d_1)=\{b_2, b_4\},$ $I(d_2)=\{b_1, b_3, b_5\},$ $I(d_3)=\{b_1, b_2\}$	$O(d_1)=\{b_1, b_5\},$ $O(d_2)=\{b_2, b_3, b_4\},$ $O(d_3)=\{b_2, b_4\}$	2, 2, 0, 1,  1
10	$\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$	$\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$	$I(d_1)=\{b_5, b_4\},$ $I(d_2)=\{b_2, b_3, b_4\},$ $I(d_3)=\{b_1, b_2\},$ $I(d_4)=\{b_5\}$	$O(d_1)=\emptyset,$ $O(d_2)=\{b_1, b_3, b_5\},$ $O(d_3)=\{b_4, b_2\}$ $O(d_4)=\{b_3, b_2\},$	1, 1, 2, 1,  1
11	$\{b_1, b_2, b_3\}$	$\{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$	$I(d_1)=\{b_1\},$ $I(d_2)=\{b_2, b_3, b_1\},$ $I(d_3)=\{b_2\},$ $I(d_4)=\emptyset,$ $I(d_5)=\{b_3\}$	$O(d_1)=\{b_2, b_3\},$ $O(d_2)=\{b_1, b_2, b_3\},$ $O(d_3)=\emptyset$	4, 0, 1
12	$\{b_1, b_2, b_3, b_4\}$	$\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$	$I(d_1)=\{b_1\},$ $I(d_2)=\emptyset,$ $I(d_3)=\{b_2, b_3\},$ $I(d_4)=\{b_4\}$	$O(d_1)=\emptyset,$ $O(d_2)=\{b_4\},$ $O(d_3)=\{b_3, b_2\}$ $O(d_4)=\{b_1\}$	4, 0, 1, 0
13	$\{b_1, b_2, b_3, b_4\}$	$\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$	$I(d_1)=\{b_4\},$ $I(d_2)=\emptyset,$ $I(d_3)=\{b_2, b_3\},$ $I(d_4)=\{b_1\}$	$O(d_1)=\emptyset,$ $O(d_2)=\{b_1\},$ $O(d_3)=\{b_2, b_3\}$ $O(d_4)=\{b_4\}$	1, 0, 1, 1

14	$\{b_1, b_2, b_3, b_4\}$	$\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$	$I(d_1) = \{b_4\},$ $I(d_2) = \emptyset,$ $I(d_3) = \{b_1, b_3\},$ $I(d_4) = \{b_2\}$	$O(d_1) = \emptyset,$ $O(d_2) = \{b_2\},$ $O(d_3) = \{b_2, b_4\}$ $O(d_4) = \{b_3\}$	4, 0, 1, 0
15	$\{b_1, b_2, b_3\}$	$\{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$	$I(d_1) = \{b_2\},$ $I(d_2) = \{b_1, b_2, b_3\},$ $I(d_3) = \{b_1\},$ $I(d_4) = \emptyset,$ $I(d_5) = \{b_2\}$	$O(d_1) = \{b_2, b_3\},$ $O(d_2) = \{b_1, b_3\},$ $O(d_3) = \emptyset$	1, 0, 1

### Задание 1

Постройте граф размеченной сети Петри по заданным множествам. Постройте граф разметки для сети Петри и определите:

- 1) какая позиция в сети накапливает максимальное количество фишек;
- 2) может ли в сети накапливаться бесконечно много фишек в какой-либо позиции и в какой;
- 3) могут ли переходы функционировать  $\infty$  число раз;
- 4) есть ли в сети потенциально мертвый переход (переход, который никогда не сработает).

### Задание 2

Создайте сетевую модель, описанную в задании 1, используя демонстрационные возможности пакета программ, просмотрите примеры построения и анализа  $N$ -схем.

### Задание 3

Создайте сетевую модель параллельной обработки заданий на ЭВМ двумя приложениями. Полученную сеть Петри проанализируйте на наличие в сети бесконечного цикла, используя демонстрационные возможности пакета программ.

Примечание. Электронный отчет, выполняемый в формате *Microsoft Word*, должен включать в себя ответы на контрольные вопросы, описание программной реализации каждого пункта выполнения лабораторной работы, а так же отражать результаты моделирования в соответствии с вариантами индивидуальных заданий.

## 8. ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

1. MATLAB 6.0. Пакет обладает мощными средствами для проведения имитационного моделирования.

2. Mathematica 6.0 Пакет обладает мощными средствами для проведения вычислений и моделирования.
3. STATISTICA Пакет для выполнения статистического моделирования
4. Сети Петри – программа для сетевого моделирования на языке сетей Петри.

## 9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖСЕССИОННОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ МАГИСТРОВ

1. Межсессионная аттестация магистров проводится дважды в семестр на 7 и 13 неделях семестра.
2. Аттестационная оценка выставляется по результатам работы в семестре: выполнения лабораторных работ по графику, выполнения контрольных работ и посещений лекционных занятий.
3. Организация аттестации магистров, проводится в соответствии с положением АмГУ о курсовых, экзаменах и зачетах.

### • 10. КАРТА КАДРОВОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ДИСЦИПЛИНЫ

Лектор – доцент, канд.техн.наук, Бушманов А.В.  
Руководитель лабораторных работ – доцент, канд.техн.наук, Бушманов А.В.

**Бушманов Александр Вениаминович,**  
*к.т.н., доцент.*



Применение методов моделирования в исследованиях и проектировании  
*Учебно-методический комплекс дисциплины*

---

Изд-во АмГУ. Подписано к печати ????. Формат ????. Усл. печ. л. ???, уч. - изд. л. ????. Тираж 100. Заказ ???.

