

ВЫСШЕЕ

ОБРАЗОВАНИЕ

Р. Ф. Маликов

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В СРЕДЕ RAND MODEL DESIGNER**

УМО ВО
РЕКОМЕНДУЕТ

 **Юрайт**
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Р. Ф. Маликов

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СРЕДЕ RAND MODEL DESIGNER

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВУЗОВ

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по ит направлениям*

**Книга доступна на образовательной платформе «Юрайт» uralt.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Москва • Юрайт • 2021

УДК 004.93(075.8)
ББК 32.973.26.018.2 я 73
М19

Автор

Маликов Рамиль Фарукович – профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий Института физики, математики, цифровых и нанотехнологий Башкирского государственного педагогического университета имени М.Акумуллы (г. Уфа)

Рецензенты:

В.Е. Гвоздев, доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики факультета информатики и робототехники (УГАТУ, Уфа);

Ю.Б.Сениченков, доктор технических наук, профессор Высшей школы программной инженерии Института компьютерных наук и технологий (СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург).

Маликов Р.Ф.

Компьютерное моделирование динамических систем в среде Rand Model Designer [Текст]: учебное пособие для вузов / Р.Ф.Маликов. – Москва: Издательство Юрайт, 2021. – 223 с. (Высшее образование). – Текст: непосредственный.

ISBN 978-5-534-14575-5

В настоящем курсе даны основные сведения по системе визуального моделирования Rand Model Designer. Рассмотрены технологии разработки компьютерных моделей динамических, гибридных систем. Приведена методология исследования линейных и нелинейных динамических систем. Исследованы сложные нелинейные динамические системы как лазеры на квантовых точках и оптический отклик от суперкристалла (2D метаповерхности регулярно расположенных квантовых точек-излучателей).

Предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по физико-математическим направлениям (01.03.00 – Математика и физика, 02.00.00 Компьютерные и информационные науки, 03.04.01 – Прикладные математика и физика) и инженерным направлениям (09.00.00 – Информатика и вычислительная техника) подготовки, для преподавателей, аспирантов, а также для инженеров, научных работников, специализирующихся в области компьютерного моделирования динамических систем и объектов.

УДК 004.93(075.8)
ББК 32.973.26.018.2 я 73

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-534-14575-5

©Р.Ф.Маликов, 2021
ООО «Издательство Юрайт», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	9
1.1. Основные направления и методологии математического и компьютерного моделирования.....	10
1.2. Языки и инструментальные системы программирования и моделирования.....	19
1.3. Уровни компьютерного моделирования.....	27
ГЛАВА 2. СРЕДА ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ RAND MODEL DESIGNER	32
2.1. Основные понятия теории визуального моделирования.....	32
2.2. Интерфейс и возможности среды Rand Model Designer.....	37
2.3. Архитектура среды Rand Model Designer.....	43
2.4. Работа исполняющей системы среды Rand Model Designer.....	45
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ	52
3.1. Моделирование полета снаряда.....	54
3.2. Моделирование колебаний двойного маятника.....	65
3.3. Моделирование колебаний маятника Фуко	70
3.4. Моделирование движения заряженных частиц в магнитном поле ...	76
3.5. Задачи на учебное моделирование.....	83
3.5.1. Движение шарика в вязкой среде.....	83
3.5.2. Движение небесного тела в гравитационном поле.....	84
3.5.3. Параметрический маятник.....	86
3.5.4. Эллиптический маятник.....	87
3.5.5. Движение заряженных частиц в кулоновском поле.....	88
3.5.6. Явление гистерезиса.....	90
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ	92
4.1. Свободное падение тела с учетом сопротивления среды (падение парашютиста).....	97
4.2. Полет одноступенчатой ракеты.....	102
4.3. Создание модели неуправляемой баллистической ракеты.....	111

4.4. Движение упругого мяча, брошенного под углом к горизонту....	118
4.5. Создание модели атмосферы.....	124
4.6. Создание модели реализации случайных событий	131
4.7. Модель компонентной системы.....	138
4.8. Компонентное моделирование электрических схем.....	143
4.9. Задачи на учебно-исследовательское моделирование.....	151
4.9.1. Биллиардный отскок.....	150
4.9.2. Грузик на пружине	152
4.9.3. Многоступенчатая ракета.....	152
4.9.4. Катапультирование с самолета.....	153
ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ	155
5.1. Линейные динамические системы.....	155
5.2. Нелинейные динамические системы.....	161
5.3. Предельные циклы и бифуркации.....	165
5.4. Моделирование линейных дискретных систем.....	172
5.5. Моделирование нелинейных дискретных систем.....	180
5.6. Моделирование непрерывных нелинейных систем.....	187
5.6.1. Исследование модели Вольтерра-Лотки.....	187
5.6.2. Исследование модели Ван-дер-Поля.....	191
5.7. Задачи на моделирование дискретных систем.....	196
5.8. Задачи на исследование нелинейных динамических систем.....	198
ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ	202
6.1. Моделирование работы лазеров на квантовых точках	202
6.2. Исследование взаимодействия оптического излучения с супер-кристаллом квантовых точек.....	213
6.3. Компьютерное моделирование динамики отклика суперкристалла в среде MATLAB и Rand Model Designer.....	221
6.4. Высокая отражательная способность суперкристалла и влияние дефазировки состояния на оптический отклик	223
ЛИТЕРАТУРА	226

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга «Практикум по компьютерному моделированию сложных систем в среде Rand Model Designer» предназначена широкому кругу читателей, интересующихся возможностями современных сред визуального моделирования окружающих нас природных и рукотворных систем. Математическое моделирование – мощнейший инструмент изучения существующих и проектирования новых систем, но математический язык, на котором записываются модели, и алгоритмические языки, с помощью которых создаются программные реализации математических моделей, достаточно сложны для многих желающих построить или использовать модели для решения практических задач.

Несомненным прорывом в области компьютерного моделирования было появление среды Simulink в конце прошлого столетия, позволившей создавать модели на языке блок-схем с входами и выходами, привычных разработчикам систем управления. Нарисованная пользователем блок-схема, автоматически превращалась средой в систему дифференциальных уравнений, решение которой строилось численно с заданной точностью опять-таки автоматически, и пользователь получал нужные ему таблицы, графики, мог проводить сложные вычислительные эксперименты, формулируя задачу на интуитивно понятном ему графическом языке и получая результаты с помощью надежных компьютерных инструментов. Simulink – это первый народный автомобиль, которым могли управлять не только математики и программисты.

У современного пользователя возможностей выбора среды моделирования много больше, чем в начале века: профессионалы, как и прежде, создают свои инструменты сами, специалисты прикладных областей продолжают использовать среды, заточенные под решение конкретных задач, а всем остальным, в том числе студентам и преподавателям, доступны Dymola, OpenModelica, AnyLogic, MapleSim, SystemModeler и другие. Выбор среды – дело ответственное: помимо хорошо написанного руководства пользователя хотелось бы иметь и учебники, методические указания по созданию моделей разного уровня сложности, доступные библиотеки моделей, курсы лекций и лабораторных работ. Смена среды – дело хлопотное и затратное, прежде всего потому, что имеющиеся наработки в одной среде не удастся автоматически перевести в другую: конвертировать модели мы не умеем, и придется все переписывать заново на новом языке моделирования.

Разработчики среды Rand Model Designer, рады, что автор книги, Рамиль Фарукович Маликов, выбрал именно ее для своего практикума по моделированию. Среда Rand Model Designer универсальная среда, позволяющая созда-

вать модели различного типа, почти так, как средах Simulink, OpenModelica, AnyLogic. Среда использует диаграммы языка UML – все это дает возможность познакомиться с различными технологиями моделирования, и, если придется, надеемся, безболезненно перейти к использованию другой среды. Автор, прежде всего, заботился о начинающих, и, на хорошо известных примерах, подробно показал, как строить модели. Разработчики среды с удовольствием сотрудничали с Рамиль Фаруковичем, консультировали и предоставляли нужные для книги материалы.

Сениченков Юрий Борисович,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого

ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие предназначено для студентов, для отработки навыков и умений математического и компьютерного моделирования реальных физических явлений и объектов, представленных в виде дифференциальных и дискретных уравнений и систем.

Учебное пособие состоит из шести глав.

Первая глава курса носит вводный характер. Здесь вводятся общие понятия о математическом, компьютерном моделировании. Здесь рассматривается классическая схема исследования на основе численного моделирования, понятия об уровнях сложности компьютерных моделей и о методологиях освоения технологий компьютерного моделирования динамических систем.

Во второй главе рассматриваются понятия о визуальном моделировании, приводится анализ программной интегрированной среды компьютерного моделирования Rand Model Designer.

В третьей главе рассмотрены технологии разработки компьютерной модели динамических систем, представленных в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. Представлены задачи для учебного моделирования в среде RMD.

В четвертой главе рассмотрены технологии создания компьютерных моделей гибридных систем. Представлены задачи на учебно-исследовательское моделирование для самостоятельного решения.

В главе пятой приведены технологии исследования линейных и нелинейных дискретных и непрерывных динамических систем с помощью системы Rand Model Designer. Представлены задачи на учебно- и научно-исследовательское моделирование динамических систем, представленных в виде непрерывных дифференциальных и дискретных уравнений.

В шестой главе приведены возможности системы Rand Model Designer для исследования сложных нелинейных динамических систем. Рассмотрены две научно-исследовательские задачи. Первая задача относится к исследованию инжекторных лазеров, в основе описания которых лежат нелинейная система дифференциальных уравнений. Вторая задача относится к задачам нелинейной оптики к разделу нанофотоника. Здесь рассматривается задача взаимодействия суперкристалла с оптическим излучением.

Целью дисциплины «Компьютерное моделирование» являются формирование и развитие следующих компетенций¹ :

¹ Компетенции по ФГОС 3 (плюс) для направления 09.03.02 – Информационные системы и технологии

– ОПК-2 - способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования

– ПК-5 - способность проводить моделирование процессов и систем;

– ПК-25 - способность обосновывать правильность выбранной модели, сопоставляя результаты экспериментальных данных и полученных решений.

Задача дисциплины направлена на изучение и освоение методик построения моделей предметных областей информационных систем и моделей реальных процессов. В результате освоения дисциплины «Компьютерное моделирование» студент должен:

Знать:

– современные методы компьютерного моделирования для исследования динамических и гибридных систем, систем массового обслуживания, электротехнических систем;

– принципы расчета динамических характеристик систем, основы построения и эксплуатации систем визуального моделирования;

– назначение и виды специализированного программного обеспечения;

– об основных терминах и понятиях дискретной имитации.

Уметь:

– применять современные методы компьютерного моделирования, обеспечивающие: построение компьютерной модели изучаемого процесса, планирование и анализ компьютерного эксперимента, обработку результатов компьютерного моделирования;

– проводить формальное описание процесса функционирования сложных систем и протекающих в них процессов, проводить компьютерные эксперименты;

– осуществлять постановку, алгоритмизацию, решение и анализ результатов типовых задач;

Владеть:

– методами и средствами представления данных и знаний о предметной области;

– инструментальными средствами аналитического и имитационного компьютерного моделирования.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность рецензентам за обсуждения и консультации при разработке компьютерных моделей в среде и признательность Ю.Б.Сениченкову за разрешение использования своих работ в целях полноты и последовательности изложения материала в данной книге.

ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

1.3. Основные направления и методологии математического и компьютерного моделирования

Модели и моделирование чрезвычайно важны в изучении объектов, процессов и явлений материального мира, так как в сущности, всю совокупность знаний человека можно представить как модель материального мира, в котором отражен сам субъект моделирования.

Модель это объект реальный или абстрактный максимально приближенный к исследуемому объекту, системе, явлению с точки зрения решаемой задачи. Здесь должно быть не только внешнее сходство с объектом, важно то что поведение модели и реального объекта должно подчиняться одинаковым закономерностям. Изучив их на адекватной для исследования модели, оказывается возможным предсказать свойства или прогнозировать развитие реального процесса или явления находящегося в труднодоступной области, или проектируемой конструкции.

Моделирование – это изучение объектов познания с помощью их моделей. Исследователь имеет дело с моделью, а не его оригиналом.

Можно выделить следующие виды моделирования (рис.1.1) [1-4]:

- информационное (концептуальное) моделирование - процесс описания информации об объекте, с помощью формализованных, неформализованных языков, образно-иллюстративных материалов и фиксированные в реальном материале эти представления и факты;
- физическое моделирование - процесс разработки, конструирование натурных, физических, аналоговых или масштабных моделей объектов и исследование свойств и картины поведения объекта и реальных явлений на этих моделях;
- математическое (имитационное, аналитическое и компьютерное) моделирование.
- математическое (визуальное) моделирование

Физические модели могут обеспечивать либо полное пространственно-временное подобие оригиналу (изучение движения корабля, самолета с помощью их уменьшенных моделей), либо только пространственное, геометрическое подобие (например, объемное проектирование), либо только временное подобие (изучение электромагнитных явлений в цепях с сосредоточенными параметрами).

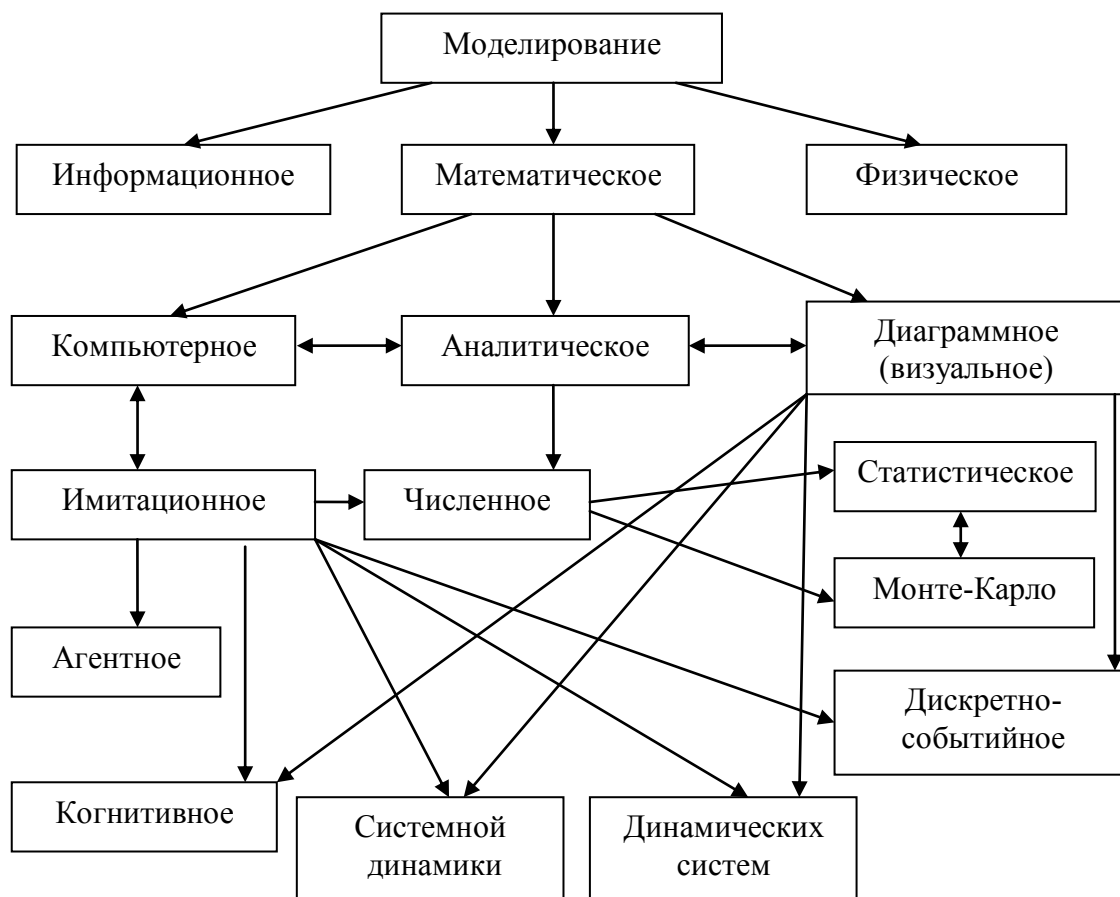


Рис.1.1. Виды математического моделирования

Приближенное описание какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженное с помощью математической символики, называется математической (аналитической) моделью. Чаще всего процессы функционирования элементов системы записываются в виде некоторых математических соотношений (алгебраических, интегро-дифференциальных и т.п.) или логических условий.

К аналитическим моделям относятся также и итерационные формулы являющиеся приближенным решением математических моделей представленных в виде дифференциальных уравнений.

Диаграммные модели это методы решения математических аналитических моделей, и могут быть определены как аналитические модели, представленные в виде диаграмм.

Рассмотрим более подробно виды и направления математического и компьютерного моделирования.

Имитационное моделирование. В связи со стремительным развитием информационных и компьютерных технологий возможности моделирования реальных объектов расширились. Появились новые технологии и методы, ко-

которые позволяют моделировать более сложные объекты и процессы, в здравоохранении, в экономических и социальных системах, в промышленности, в науке и в других областях и сферах деятельности. Создание новых систем (пакетов) моделирования привело к появлению нового типа компьютерных моделей – «имитационных моделей», здесь моделирование невозможно без использования компьютеров. Таким образом, имитационное моделирование – это высокоуровневая информационная технология с применением компьютеров и используется при моделировании сложных систем.

Под имитационным моделированием понимается *«разработка модели системы в виде программы для компьютера и проведение экспериментов с программой, вместо проведения экспериментов с реальной системой или объектом»*.

Эксперимент с моделью можно либо многократно повторять при разных исходных данных, чтобы изучить и оценить последствия каких-либо действий на реальную обстановку, либо проводится одновременно со многими другими похожими объектами, но поставленными в разные условия.

Имитационное моделирование применяется, когда невозможно построить аналитическую модель системы, учитывающую причинные связи, последствия, нелинейности, стохастические переменные, когда необходимо имитировать поведение системы во времени, рассматривая различные возможные сценарии ее развития при изменении внешних и внутренних условий.

Имитационные модели строятся по разным методологиям, технологии которых развиваются. Создаются и модернизируются инструментальные средства компьютерного имитационного моделирования. Созданные модели отображают реальность с той или иной степенью точности.

Направление статистического моделирования (в т.ч. методы Монте-Карло) является разновидностью имитационного моделирования. Первоначально это направление появилось в теории случайных процессов и математической статистике как способ вычисления статистических характеристик случайных процессов путем многократного воспроизведения течения процесса с помощью модели этого процесса. Такой подход к исследованию реальных процессов был назван методом статистических испытаний (методом Монте-Карло)[5-7]. Модели при такой разработке строятся для явлений и систем объектов, входы и (или) функциональные соотношения между различными компонентами которой содержат элементы случайности или полностью случайных процессов, подчиняющиеся вероятностным законам и называются вероятностно-имитационными моделями. Реализация решения такой вероятност-

ной модели реального объекта осуществляется на ЭВМ. Машинная имитация позволяет исследовать модель, как в определенные моменты времени, так и в течение продолжительных периодов времени. Для нахождения устойчивых решений (характеристик) при численном статистическом моделировании требуется его многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой. Здесь проводится имитация воздействия многочисленных случайных факторов на различные элементы модели. Каждое воздействие на процесс в модели представляется в виде «розыгрыша» случайного явления с помощью процедуры, дающей случайный результат. Множество таких реализаций в ходе одного варианта имитации дает одну реализацию (историю) процесса. Затем вычисляются средние статистические характеристики по многим историям. Вероятностно-имитационное моделирование – применение теории вероятностей и методов Монте-Карло широко используются для построения имитационных моделей в молекулярной, статистической, квантовой, нейтронной физике, геофизике, газовой динамике, химической кинетике, в передаче и защите информации, в моделях массового обслуживания, финансовой математики, математической биологии и др. Разработанные модели чаще всего являются научно-исследовательскими моделями.

Следующее направление статистического моделирования это изучение и обработка статистических данных (кратко статистики). Статистика представляется в виде объекта моделирования. На первом этапе определяются характеристики объекта исследования как средне-арифметическое, дисперсия, мода, медиана, эксцесс и др. Строятся графическое (визуальное) представление объекта исследования как гистограмма, полигон. Затем подбирается теоретическая модель в виде функции распределения, похожая на экспериментальную гистограмму. Определяется оценка схожести теоретической и экспериментальной на основе критериев согласия, в частности Стьюдента и Пирсона.

На втором этапе начинаются исследования, направленные на выяснение причин (факторов) приведших к такому виду статистики. Строятся различные факторные диаграммы и регрессионные модели. Проводятся факторный регрессионный анализы. Далее изучаются другие виды статистики, проводятся дисперсионные и корреляционные анализы.

Это направление широко используется в педагогике, психологии, экономике, в бизнесе и в других отраслях. Направление статистического моделирования стало очень актуальным в связи с ростом статистических данных в разных областях и развитием методов обработки больших данных и называется

статистическое моделирование больших данных и развивается в двух направлениях: BIG DATA (большие данные) и DATA MINING (добыча данных, интеллектуальный анализ данных, глубинный анализ данных). В основе методов DATA MINING лежат различные методы классификации, моделирования и прогнозирования, основанные на применении искусственных нейронных сетей, деревьев решений, эволюционного программирования, генетических алгоритмов, нечёткой логики, ассоциативной памяти. К методам DATA MINING также относятся *статистические методы* как дескриптивный анализ, корреляционный и регрессионный анализ, факторный анализ, дисперсионный анализ, анализ временных рядов, дискриминантный анализ, компонентный анализ, анализ выживаемости, анализ связей.

Дискретно-событийное моделирование. Дж. Гордон, в начале 1960-х годов спроектировал и реализовал на IBM систему имитационного программирования GPSS (Global Purpose Simulation System). Основной объект в этой системе — транзакт (заявка на обслуживание). Это некоторый объект, который определенным образом представляет собой работников, клиентов, покупателей, детали, сырье, документы, сигналы и т. п. в среде программирования GPSS. «Перемещаясь» по модели, транзакты становятся в очереди к одноканальным и многоканальным устройствам, захватывают и освобождают эти устройства, расщепляются, уничтожаются и т. д. Таким образом, мы имеем дискретно-событийную модель, которая представляет собой глобальную схему обслуживания заявок. Аналитические результаты для большого количества частных случаев таких моделей рассматриваются в теории массового обслуживания.

Этот подход используется для описания функционирования системы (процесса) из одного состояния в другое дискретным образом в виде события. Подход к построению имитационных моделей, предлагающий аппроксимировать реальные процессы такими событиями, и называется "дискретно-событийным" моделированием (discrete event modeling). Этот вид моделирования чаще всего используется для производственных процессов, где динамика системы может быть представлена как последовательность операций («процессное моделирование»). Данный подход широко применяется в теории массового обслуживания, который изучает широкий класс случайных процессов в системах распространения информации, информационно-коммуникативных системах (компьютеры, интернет, связь и т.д.) и в различных отраслях массового обслуживания (автомобильный,

железнодорожный, транспорт, аэропорты, поликлиники, санаторные и лечебные учреждения, любые торговые предприятия, сферы обслуживания и др.) [8-14].

Система массового обслуживания (СМО) предназначена для обслуживания потока заявок, поступающих на канал обслуживания (прибор) в случайные моменты времени. Обслуживание заявки также длится случайное время. Процесс работы СМО является случайным с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Агентное моделирование (agent-based model (ABM)) – разновидность имитационного моделирования, современный метод, позволяющий исследовать работу децентрализованных агентов и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом [14-16, 56, 57].

В отличие от системной динамики аналитик определяет поведение агентов на индивидуальном уровне, а глобальное поведение возникает как результат деятельности множества агентов (моделирование «снизу вверх»).

Ингредиенты агентного моделирования.

Агент – это некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться. Агентами могут быть: люди (потребители, жители, работники пациенты, доктора, клиенты, солдаты и др.); транспорт, оборудование (автомобили, краны, самолёты, вагоны, станки, ...); нематериальные вещи (проекты, продукты, инновации, идеи, инвестиции...); организации (компании, политические партии, страны, ...).

Среда – некоторое пространство, в котором находятся агенты, характеризующая своими состояниями и факторами, агенты находятся в определенном месте этого пространства, с возможностью ориентирования и передвижения в данном пространстве;

Правила взаимодействия – законы взаимодействия агентов в окружающей среде, с процедурами принятия решения и выбора стратегии при очередном шаге взаимодействия.

Задача имитационного моделирования при агентном подходе заключается в определении характеристик состояния агентов и среды, изучения поведения агентов при различных ситуациях взаимодействия и изменяющихся состояниях среды.

Через изучение поведения множества агентов в некотором пространстве согласно некоторым правилам взаимодействия, прогнозирование поведения системы в целом.

Цель создания агентных моделей — получить представление об этих глобальных правилах, выявление закономерностей общего поведения системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении ее отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе.

Агентный подход позволяет исследовать задачи коллективного взаимодействия, эффективно решать задачи прогнозирования. Агентные системы позволяют исследовать процессы самоорганизации, дают возможность естественного описания сложных систем, обладают высокой гибкостью [15].

Системная динамика – парадигма моделирования, где для исследуемой системы строятся диаграммы причинных связей (графы) и глобальных влияний одних параметров на другие во времени, а затем созданная на основе этих диаграмм компьютерная модель используется для имитации [17-22]. Метод основан Дж. [Форрестером](#) в 1950-х годах и используется для анализа сложных систем с нелинейными обратными связями [17]. По сути, такой вид моделирования более всех других парадигм **помогает** понять суть происходящего выявления причинно-следственных связей между объектами и явлениями. С помощью системной динамики строят модели общества, мировой динамики, бизнес-процессов, развития города, модели производства, динамики популяции, экологии и развития эпидемии и другие [20-22]. Базовая структура модели представляются в виде специализированного графа, и могут, в конечном счете, преобразованы в систему дифференциальных уравнений.

Модель Форрестера – простая, ясная и полезная модель – иллюстрирует интересный графовый подход к моделированию сложных нелинейных систем. Задуманная как учебный пример применения метода системной динамики, она стала образцом для последующих работ, привлекла внимание к проблеме мировой динамики, дала толчок к проведению других исследований, что привело к появлению целого направления, получившего название глобального моделирования. Модели такого рода применяются для прогнозирования демографии, финансового анализа, экологии, экономики и социологии.

Методология когнитивного моделирования, предназначенная для анализа и принятия решений в *плохо определенных ситуациях*, была предложена американским исследователем Р. Аксельродом². Изначально когнитивный

² Structure of Decision. The cognitive Maps of Political Elites / Ed. R. Axelrod. N.Y.: Princeton, 1976.

анализ сформировался в рамках социальной психологии, а именно – когнитивизма, занимающегося изучением процессов восприятия и познания. Применения разработок социальной психологии в теории управления привело к формированию особой отрасли знаний – когнитологии, концентрирующей на исследовании проблем управления и принятия решений.

Под когнитивными технологиями понимается широкий спектр технологий рационализации и формализации интеллектуальных систем создания и функционирования знаний, экспертизы, коммуникации и принятия решения [23-26]. Когнитивные информационные технологии представляет собой совокупность методов, приемов, действий, процессов, осуществляемых в определенной последовательности, инструментальных средств (ПК), позволяющих преобразовать входную информацию в варианты управленческого решения.

Когнитивные технологии моделирования по типу близки к методологии системной динамики, т.к. в конечном счете представляются в виде когнитивных карт, в которой изображена структурная диаграмма взаимодействия элементов и подсистем объекта исследования (когнитивная модель), на основе которых строятся аналитические модели в виде систем дифференциальных уравнений, также как в системной динамике.

Моделирование динамических систем. Под *динамической системой* будем понимать любой объект, процесс или явление, для которого однозначно определено понятие состояния как совокупности некоторых величин и задан закон, который описывает изменение начального состояния с течением времени, двигающуюся в пространстве и изменяющуюся во времени. Динамическими объектами могут быть механические, производственные, физические, химические, биологические объекты, вычислительные процессы и др.

Динамические системы описываются различными способами: дифференциальными уравнениями, дискретными отображениями, марковскими цепями, графическими образами и др. Они классифицируются в зависимости от вида оператора отображения и структуры фазового пространства. Различают линейные и нелинейные, непрерывные и дискретные операторы в соответствии определяют системы линейные и нелинейные, системы с *дискретным* временем и системы с *непрерывным* временем.

В основе методологии *моделирования динамических систем* и построения объектно-ориентированных моделей в технических системах лежит агрегативный подход, который был заложен в 1960-70-х годах советским ученым

Н.П.Бусленко, здесь сложная система представлялась в виде агрегата (черного ящика), имеющего множество входных и выходных сигналов и воздействующих управляющих сигналов. Математически агрегат задается совокупностью множеств T, X, G, Y, Z и случайными операторами H и G , где T – множество моментов времени, X, G, Y – множества входных, управляющих выходных сигналов агрегата, H и G операторы переходов и выхода. Этот подход широко используется при исследовании сложных индивидуальных управленческих систем, к которым относятся АСУ [5, 27-29]. Агрегативные системы позволяют описать широкий круг объектов исследования с отображением системного характера этих сложных объектов, с возможностью расчленения сложной системы на конечное число подсистем, с сохранением связей между ними и взаимодействия частей. В теории автоматического управления основным объектом изучения являются системы управления сложными динамическими (техническими) объектами и ее элементами. Математические модели систем автоматического управления и ее элементов представляются в виде уравнений динамики (движения), которые записываются либо в форме дифференциальных, интегральных и разностных уравнений, либо в виде уравнений «вход-выход» (в общем случае матричных уравнений) в пространстве состояний, благодаря которому они нашли широкое применение в инженерной практике. Описание динамических систем и элементов в пространстве состояний позволяет легко перейти к уравнениям для моделирования на ЭВМ, а также провести моделирование систем автоматического управления в виде структурных схем с помощью аппарата передаточных функций и динамических звеньев [3, 5, 28-31]. Для моделирования динамических систем используются системы визуального моделирования, так называемые среды схемотехнического моделирования: VISSIM, SIMULINK+ MATLAB, PowerSim, LabView, Easy5, Rand Model Designer и др.

Аналитическое моделирование. Под аналитическим моделированием мы будем понимать процесс формализации реального объекта и нахождение его решения в аналитических функциях.

Специалисты, занимающиеся математическим моделированием, исследование объекта или явления обычно начинают с поиска возможных аналитических решений упрощенной математической модели, используя различные приближения, т.е. на самом деле решают упрощенную задачу (модель).

Полученные аналитические решения для упрощенной модели удовлетворительно характеризует суть явлений. Аналитические решения позволяют по-

нять и наглядно представить основные закономерности особенно при изучении нового явления или процесса.

Однако возможности нахождения аналитического решения при исследовании не простых моделей ограничены, поэтому решения часто строятся в виде алгебраических итерационных формул. Представленные в виде алгебраических уравнений итерационные модели, можно решать приближенно, используя численные методы. Процедуру построения математической модели какого-либо реального явления или процесса и нахождение численного решения с помощью итерационных формул и применением компьютеров часто называют **численным моделированием**.

Компьютерное моделирование. Имеется множество определений, что такое компьютерное моделирование: это процесс вычисления компьютерной модели (иначе численной модели) на одном или нескольких вычислительных узлах; это метод решения задач анализа или синтеза сложной системы на основе использования ее компьютерной модели. В любом случае компьютерное моделирование связано с вычислительным устройством в виде компьютера и так называемым компьютерной моделью.

Под «компьютером» мы понимаем совокупность аппаратной части и операционной системы. В нашем случае это Intel-совместимый компьютер, и MS Windows и наличие программного обеспечения для построения компьютерных моделей. Рассмотрим определения, что такое компьютерная модель.

Компьютерная модель (англ. computer model) – это (1) компьютерная программа, работающая на отдельном компьютере, суперкомпьютере или множестве взаимодействующих компьютеров (вычислительных узлов), реализующая абстрактную модель некоторой системы; это (2) модель, выполненная с помощью компьютерных информационных, схематичных, электронных устройств и технологий и сетей; это (3) созданный за счет ресурсов компьютера виртуальный образ, качественно и количественно отражающий внутренние свойства и связи моделируемого объекта, иногда передающий и его внешние характеристики; это (4) модель, воспроизводящая моделируемый объект программными средствами на компьютере; это (5) моделирующая программа, выполняемая на компьютере, которая имитирует поведение моделируемого объекта, то есть воспроизводит в модельном времени такую же последовательность действий, которую мы наблюдали бы у моделируемого объекта в аналогичных условиях в реальном времени.

Компьютерная модель в сущности это некоторая программа, созданная на основе аналитических и имитационных моделей. Если модельное время синхронизировано с реальным временем, то компьютерная модель становится физическим имитатором моделируемого объекта.

Проведение множества экспериментов с компьютерной моделью для изучения характеристик моделируемого объекта, выяснения картины изучаемого процесса, для получения ответа на вопрос, «что будет, если.....» называется компьютерным моделированием.

Разработке компьютерной модели предшествуют мысленные, вербальные, структурные, математические и алгоритмические модели. Компьютерные модели различаются по видам применения: обучающие, научно-исследовательские, научно-технические для исследования процессов и явлений, реальных объектов и промышленные, встроенные в производственный процесс или адекватно моделирующие производственные процессы на компьютерах.

Компьютерные модели условно можно подразделить на простые, средние, сложные и очень сложные, в зависимости от сложности объекта в рассматриваемой задаче. От выбора программной среды зависит алгоритм построения компьютерной модели, а также форма его представления.

Если это блок-схема, задачу можно решить в разных средах. В среде программирования – это программа, записанная на алгоритмическом языке. В средах компьютерного моделирования – это последовательность технологических приемов, приводящая к решению задачи.

Для создания компьютерных моделей сложных объектов и систем используется подход разработки информационных систем, который заключается: в проектировании компьютерной модели как сложной информационной системы; в использовании методологий имитационного моделирования; в выборе программной среды для разработки компьютерной модели.

К компьютерным моделям можно отнести виртуальные модели, создаваемые в интегрированных программных средах как: MultiSim, Maple, Simulink+MatLAB, Vissim, AutoCAD, LabVIEW, а также компьютерные виртуальные модели, созданные в отраслевых Системах Автоматического Проектирования и Моделирования (технические, строительные, архитектурные, геоинформационные и др.). Технические САПРы построены по типу конструктора, где имеются и можно проектировать компьютерные аналоги измерительных

приборов (вольтметры, амперметры, осциллографы, генераторы, электродвигатели, логические схемы и т.п.).

1.2. Языки и инструментальные системы программирования и среды моделирования

Языков программирования достаточно много, для разработки программ моделирования могут быть использованы как языки общего назначения (ЯОМ), так и языки имитационного моделирования (ЯИМ).

К языкам общего назначения можно отнести следующие языки программирования:

- **языки процедурного (императивного) программирования** здесь манипулируют данными в пошаговом режиме, используя последовательности из нескольких низкоуровневых инструкций, или команд. Исходя из того, что программа, по сути, представляла собой набор директив, обращенных к компьютеру: Fortran (1954), ALGOL(1960), COBOL(1960), Pascal (1970), Modula (1981), C (1972), Basic (1963) и их модификации;
- **языки функционального программирования** – это языки, в которых единственным действием является вызов функции, единственным способом расчленения программы на части является введение имени для функции, а единственным правилом композиции – оператор суперпозиции функции. Отличительной особенностью функционального подхода является то, что любая программа, написанная на таком языке, может интерпретироваться как функция с одним или несколькими аргументами. Такой подход дает возможность прозрачного моделирования текста программ математическими средствами, а значит, весьма интересен с теоретической точки зрения. Сложные программы при таком подходе строятся посредством агрегирования функций. При этом текст программы представляет собой функцию, некоторые аргументы которой можно также рассматривать как функции. Таким образом, повторное использование кода сводится к вызову ранее описанной функции, структура которой, в отличие от процедуры императивного языка, математически прозрачна. К языкам такого типа относятся: Lisp (1958), РЕФАЛ (1968), Scheme (1975), FP(1977), ML (1978), Miranda (1985), Standart ML(1985), Haskell (1990, 1998), F#(2010);
- **языки логического программирования.** Программа строится в виде совокупности правил или логических высказываний. Кроме того, в программе допустимы логические причинно-следственные связи, в частно-

сти, на основе операции импликации. Эти языки программирования базируются на классической логике и применимы для систем логического вывода, в частности, для так называемых экспертных систем. На языках логического программирования естественно формализуется логика поведения, и они применимы для описаний правил принятия решений, например, в системах, ориентированных на поддержку бизнеса. Примеры: Prolog (1971), Prolog II (1980), IC-Prolog (1982), LogLisp (1982), LCA 91982), M-Prolog (1983), T-Prolog (1983), Concurrent Prolog (1983), PARLOG (1983), LQF (1984), LEAF (1985), GHC (1986), Goedel (1992), Mercury (1993);

- **языки объектно-ориентированного программирования** содержат конструкции, позволяющие определять объекты, принадлежащие классам и обладающие свойствами инкапсуляции, наследования и полиморфизма. В рамках данного подхода программа представляет собой описание объектов, их свойств (или атрибутов), совокупностей (или классов), отношений между ними, способов их взаимодействия и операций над объектами (или методов). Примеры: Simula (1962), SmallTalk (1972), Beta (1975), C++(1983), Object Pascal (1984), Self (1986), Cecil (1992), Java (1995), C# (2000), Visual Basic (1990), GPSS (1961), Modelica(1997).

Языки программирования в целом ориентированы на определенную область применения. Например, для научных вычислений и исследований можно использовать языки C++, FORTRAN, Java; для системного программирования языки C++, Java; для обработки информации языки C++, Java, COBOL; для решения задач искусственного интеллекта LISP, Prolog.

Кроме этих языков созданы языки программирования специализированные для некоторой предметной области, чаще всего используемые для разработки пользовательского интерфейса.

- **Языки форматирования текстов** для издательских систем, систем подготовки научных публикаций с большим количеством формул. Примеры: TeX, LaTeX, Troff, Nroff.
- **Языки разметки** для универсальных форматов представления структурированных данных, описания документов. Примеры: SGML, KML, XML, HTML, MathML.
- **Языки скриптов или сценариев** для разработки командных пакетных файлов для командных интерпретаторов. В рамках данного подхода программа представляет собой совокупность возможных сценариев обработки данных, выбор которых инициируется наступлением того или

иного события (щелчок по кнопке мыши, попадание курсора в определенную позицию, изменение атрибутов того или иного объекта, переполнение буфера памяти и т.д.). События могут инициироваться как операционной системой (в частности, Microsoft Windows), так и пользователем. Примеры: Tcl/Tk, VBScript, PowerScript, LotusScript, Javascript, Perl, Sh, Bash, Csh, Ksh.

- **Языки создания графики** для подготовки визуальной графической информации. Пример: PostScript, OpenGL.
- **Языки описания виртуальной реальности** для создания трехмерных изображений, так называемых виртуальных миров. Примеры: VRML, Dупамо и другие.

На рис 1.2 представлена генеалогия основных языков программирования, начиная с момента возникновения и до сегодняшней версии программного продукта.

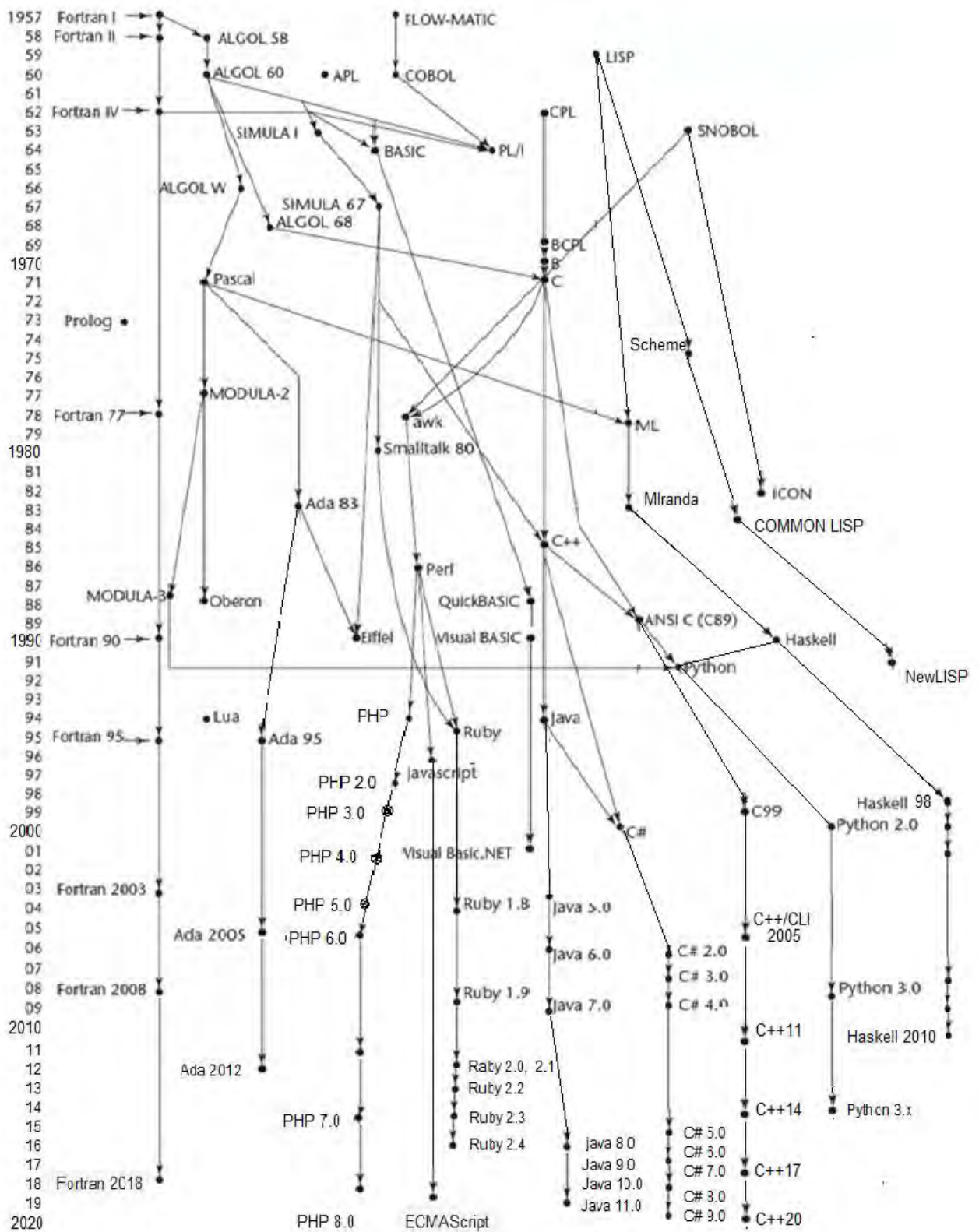


Рис. 1.2. Гениалогия основных языков программирования
 Большинство команд и функций системы хранится в виде текстовых файлов с расширением

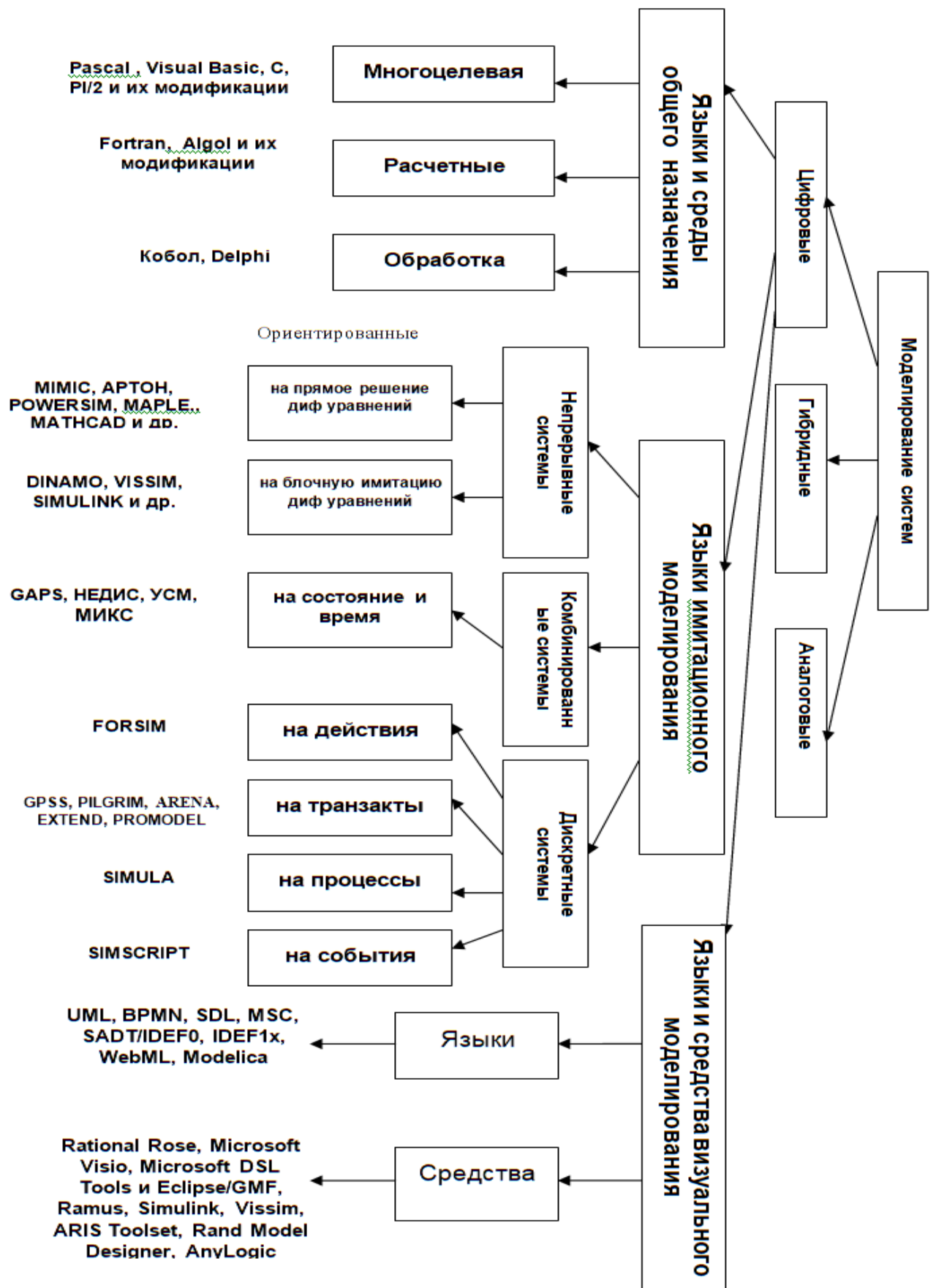


Рис. 1.3. Языки и средства моделирования сложных систем

Надо отметить, чистых языков программирования отвечающих той или иной парадигме не так много. Многие языки, перечисленные выше, отвечают за большинство концепций популярных парадигм программирования. Например, современные языки программирования Oz, Lisp включает в себя возможности логического, функционального, императивного, объектно-ориентированного, программирования с ограничениями, распределённого и параллельного программирования. Для разработки компьютерных моделей при аналитическом моделировании используются языки процедурного (императивного) и функционального программирования. На рис.1.3 представлены языки и системы программирования для имитационного и визуального моделирования систем.

Непрерывный подход. Непрерывное представление системы S сводится к составлению уравнений, с помощью которых устанавливается связь между зависимыми и независимыми переменными модели. Примером такого непрерывного подхода является использование дифференциальных уравнений.

Причем в дальнейшем дифференциальные уравнения могут быть применены для непосредственного получения характеристик системы. Примеры: распространенным языком для имитационного моделирования непрерывных систем являются языки DYNAMO, POWERSIM, MIMIC, АРТОН, языки и среды императивного программирования.

Для моделирования непрерывных динамических систем получил распространение язык CSMP, который реализует пакетный режим взаимодействия с пользователем. Появились и другие языки и системы моделирования непрерывных процессов, такие как MIDAS, PACTOLUS, CSSL. К отечественным языкам и системам моделирования непрерывных динамических систем относятся МАСЛИН и МАСС (разработанные сотрудниками МЭИ).

Комбинированный подход. Представление системы S в виде типовой схемы, в которой участвуют как непрерывные, так и дискретные величины, называется *комбинированным*. Состояние модели системы $K(S)$ описывается набором переменных, некоторые из которых меняются во времени непрерывно.

Законы изменения непрерывных компонент заложены в структуру, объединяющую дифференциальные уравнения и условия относительно переменных. Предполагается, что в системе могут наступать события двух типов:

- 1) события, зависящие от состояния системы;

2) события, зависящие от времени.

События первого типа наступают в результате выполнения условий, относящихся к законам изменения непрерывных переменных.

Для событий второго типа процесс моделирования состоит в продвижении системного времени от момента наступления события до следующего аналогичного момента.

Примеры языков для комбинированных систем: язык СЛАМ, объединяющий в одной оболочке языки GPSS и DYNAMO, т.е. позволяющий строить непрерывно-дискретные модели систем и «имеет практически неограниченные возможности». Примерами языков, реализующих комбинированное моделирование, являются GASP, НЕДИС и МИКС.

GASP является расширением языка ФОРТРАН. Здесь непрерывные алгоритмы моделируются дифференциальными уравнениями, а дискретные процессы представляются в виде событий, наступление которых зависит от процесса функционирования системы. Событие — переход системы из одного состояния в другое в соответствии с принятыми правилами.

НЕДИС — язык моделирования непрерывно-дискретных систем разработан сотрудниками Института кибернетики Академии наук Украины (1973г.). НЕДИС создан на основе алгоритмических языков высокого уровня и относится к системам программирования универсального типа, т.е. языки GASP и НЕДИС относятся к процедурным языкам программирования. Язык моделирования непрерывно-дискретных систем НЕДИС является расширением объектно-ориентированного языка Simula-67.

МИКС (моделирование имитационное комбинированных систем) представляет собой удобное средство моделирования. Как и язык МАСЛИН, МАСС система МИКС имеет в своей основе блочно-ориентированный язык с непроцедурной технологией программирования, позволяющей легко и быстро моделировать исследуемую систему, осуществлять быстрое преобразование модели, воспроизводить реально действующие сигналы и организовать вычислительный эксперимент. Блочные языки и соответствующие программные модули позволяют легко реализовать динамическое распределение памяти посредством размещения во внешнее запоминающее устройство (ВЗУ) больших библиотек модулей, извлекать их по мере необходимости, пересылать их в оперативную память.

Для *дискретного подхода* можно выделить несколько принципиально различных групп языков имитационного моделирования (ЯИМ).

Первая группа ЯИМ подразумевает наличие списка событий, отличающих моменты начала выполнения операций. Продвижение времени осуществляется по событиям, в моменты наступления которых производятся необходимые операции, включая операции пополнения списка событий. Пример языка моделирования, ориентированного на транзакты (сообщения, заявки, запросы): Arena, Extend, ProModel, SimProcess, Pilgrim, Taylor, Witness, GPSS и др. Язык GPSS получил наиболее широкое распространение по сравнению с другими языками моделирования. Он включен в институтские учебные курсы по моделированию систем у нас в стране и изучается в аналогичных курсах во многих колледжах и университетах США и других стран.

При использовании ЯИМ второй группы после пересчета системного времени, в отличие от схемы языка событий, просмотр действий с целью проверки выполнения условий начала или окончания какого-либо действия производится непрерывно. Просмотр действий определяет очередность появления событий. Пример языка моделирования, ориентированного на события: SIMSCRIPT расширения языка Фортран.

Третья группа ЯИМ описывает системы, поведение которых определяется процессами. В данном случае под процессом понимается последовательность событий, связь между которыми устанавливается с помощью набора специальных отношений. Динамика заложена в независимо управляемых программах, которые в совокупности составляют программу процесса. Пример языка моделирования, ориентированного на процессы: SIMULA, представляющий собой расширение языка АЛГОЛ.

Система Modelling является средством визуального проектирования дискретных и непрерывно-дискретных имитационных моделей (ДИМ и НДИМ). Главная область применения СИМ Modelling – разработка имитационных моделей и специализированных СИМ при изучении и проектировании сложных комплексных систем (систем массового обслуживания, АСОИУ и др.), где использование стандартных средств проектирования (MATLAB, GPSS и подобных) неудобно или неэффективно.

Инструменты визуального компьютерного моделирования. В таблице 1 представлены широко используемые инструменты визуального моделирования для различных систем. В первом столбце представлены инструментальные средства для визуального моделирования динамических систем, во втором столбце среды моделирования глобальных процессов получивших название системная динамика. Для агентного визуального моделирования широко ис-

пользуются среды Simplex3, NetLogo и AnyLogic. Для дискретно-событийного моделирование систем массового обслуживания могут быть использованы среды визуального моделирования, представленные в четвертом столбце.

Таблица 1

Динамических систем	Системной динамики	Агентных систем	Систем массового обслуживания	Радио- и электротехнических систем	Информационных систем
MATLAB/ Simulink Vissim, Design LAB, Rand Model Designer и др.	AnyLogic, Ithink, Arena, VenSim, SimBioSys, eM-Plant, SimuLab, Tecnomatix, Plant Simulation, PowerSim, ExtendSim и др.	Simplex3, AnyLogic, NetLogo.	GPSS – Studio, AnyLogic, Rand Model Designer, ExtendSim и др.	MultiSIM, Vissim, MATLAB/ Simulink, P – CAD, MicroCAD, LabVIEW, Rand Model Designer, PSpice и др.	BPWin, ERWin, Ramus, Rational Rose, UML 2.x, Designer / 2000, ARIS Toolset, BPMN и др.

Среды для схмотехнического моделирования радио и электротехнических систем представлены в пятом столбце. В последнем столбце представлены средства функционального моделирования программного обеспечения или визуального проектирования архитектуры информационных систем.

Отметим что инструменты визуального моделирования GPSS –Studio (компания Элина-Компьютер), AnyLogic (компания AnyLogic), Rand Model Designer (MVStadium), разработаны в России, широко используются и являются одними из лучших программных продуктов в мире.

1.3. Уровни компьютерного моделирования

С целью оказания помощи в освоении основ компьютерного моделирования, нами были разработаны и изданы ряд учебных пособий [1, 32–34], в которых представлены более 100 аналитических и имитационных моделей. Они могут быть базовыми при создании цифровых двойников объектов и процессов. Часть этих работ находится в открытом доступе на сайте Национального общества имитационного моделирования – <http://simulation.su/ru.html> или в Интернете. Эти задачи и построенные модели отвечают требованиям многоуровневой парадигмы подготовки кадров по компьютерному и имитационному моделированию.

Парадигма компьютерного моделирования динамических систем на двух первых уровнях совпадает с парадигмой имитационного моделирования,

которая изложена в работах [34-36] и может предстать в виде следующих уровней:

- *учебное моделирование;*
- *научно-исследовательское моделирование;*
- *профессионально-промышленное моделирование.*

Учебное моделирование – это разработка учебных моделей, выполняемых под руководством «учителя» (в учебном заведении, на курсах или просто в рабочей обстановке). Учебное моделирование можно подразделить на две ступени:

- *учебно-познавательное моделирование;*
- *учебно-исследовательское моделирование.*

При *учебно-познавательном моделировании* происходит передача знаний, освоение методов имитационного моделирования, здесь на алгоритме построения этих моделей «ученик» знакомится с основными методологиями и информационными системами и технологиями компьютерного моделирования, приобретает знания и навыки разработки моделей. Как правило, эти модели являются не сложными по объему и логике, простыми в разработке, такие модели называются типовыми. Построение одной учебной модели укладывается в рамки учебного процесса в форме лабораторных и практических занятий. Эти модели являются прототипами для построения учебных моделей для других классов СМО и подобных объектов и систем. Во второй и третьей главе данного пособия приведены такого рода задачи.

Учебно-исследовательское моделирование отличается продолжительностью разработки, так как здесь модели уже более сложные. Разработка одной модели может занимать несколько занятий или выполняться в рамках курсовой работы по моделированию на 3 курсе и курсового проектирования на 4 курсе. При выполнении курсовых работ и проектов происходит первичное формирование научно-исследовательских навыков «ученика». Здесь идет обучение не по готовым разработкам, а по самостоятельно проектируемым и разрабатываемым учеником компьютерных моделей по аналогии с другими классами динамических систем и аналогичными или подобными объектами и системами. Разработка как учебно-познавательных, так и учебно-исследовательских моделей проводится как с помощью языков программирования Паскаль, Фортран, так и с помощью современных средств компьютерной математики, таких, как MathCAD, Maple, MATLAB, Matematica, Modelica и др. Особый интерес для разработки компьютерных моделей динамических систем

представляет российская разработка – среда визуального моделирования Rand Model Designer [48-50], которая обладает рядом преимуществ по сравнению с другими системами компьютерного моделирования.

Следующий уровень компьютерного моделирования – это *научно-исследовательское моделирование*, чаще всего выполняется на кафедрах учебных заведений в рамках договорных или чисто исследовательских работ. Эти модели создаются для проведения научных исследований, разработки проводятся в учебном заведении в рамках квалификационной или диссертационной работы. Научно-исследовательское моделирование можно подразделить на несколько ступеней (этапов), связанных с уровнем образования и типом учреждения:

- выполнение квалификационной работы на уровне бакалавриата;
- магистерская квалификационная работа, выполняемая в рамках исследовательской темы в учебном заведении или академической темы в исследовательском учреждении, идеальный вариант, если они совмещаются;
- выполнение научно-исследовательской квалификационной работы на уровне аспирантуры в учебных заведениях или на научно-исследовательских лабораториях академических институтов.

Модели, разрабатываемые «учениками» на этих уровнях образования бывают достаточно сложными и функциональными и чаще всего имеют научную значимость и академическую ориентированность.

Научно-исследовательская работа на уровне бакалавриата является квалификационной. Здесь чаще всего разработчик демонстрирует компетентность в области разработки информационных систем, в частности компьютерных моделей. В выпускной работе представляется анализ предметной области, проект компьютерной модели, реализация компьютерной модели в выбранной среде моделирования и некоторые результаты вычислительных экспериментов.

Магистерская работа, хотя и является квалификационной, может проводиться с элементами начальных научных изысканий. В этих целях происходит модификация компьютерной модели, разработанной на уровне бакалавриата согласно актуальности исследования, практической значимости, на уровне проектирования и разработки модели и адекватности разработанной компьютерной модели реальной системе или разрабатывается новая компьютерная программная установка для новой темы исследования. Здесь проходят все этапы математического моделирования, в котором представлена достаточ-

ная компетентность по разработке компьютерных моделей. После тестирования и отладки разработанной компьютерной модели проводятся научно-исследовательские работы согласно стратегическому и тактическому планированию компьютерных вычислительных экспериментов, а результаты обработки представляются в виде научных публикаций на разных уровнях (семинарах, конференциях, в журнальных статьях). На этой ступени подготовки кадров идет формирование компетенций «ученика» как научного исследователя.

Характерная особенность научно-исследовательского моделирования заключается в том, что разработчик является исполнителем, а заказчиком выступает учебное заведение или академический институт, в рамках которого выполняется государственная или академическая тема исследования. Разработчику представляется достаточная свобода в выборе средств моделирования и направления исследований. Он разрабатывает модели по своему усмотрению в избранных им средах моделирования, проводит выполнение работ по моделированию, оценивает результаты этих работ и представляет результаты исследований научной общественности.

Научно-исследовательская работа в полном объеме реализуется на ступени аспирантуры. Длительность обучения в аспирантуре составляет по новым стандартам 4 года. За это время обучаемый разрабатывает класс компьютерных моделей, на которых проводятся полномасштабные научные исследования, решаются актуальные фундаментальные задачи в выбранной области исследования.

Уровень *профессионально-промышленного моделирования* имеет два направления. Первое направление это *профессиональное моделирование* и носит исследовательский характер, здесь предполагается наличие заказчика-грантодателя, который с большим пристрастием относится к результатам исследования, так как платит за эту работу деньги в рамках соответствующих грантов РФФИ, РНФ и др. Успех всего исследовательского проекта зависит от того, насколько группе исследователей удаётся оправдать ожидания грантодателей. Основные результаты исследования передаются грантодателям в виде обычного отчёта.

Второе направление профессионально-промышленного моделирования это заказное *промышленное моделирование*. Здесь задача, функциональные показатели и возможности компьютерной модели, внешний интерфейс определяется заказчиком от производства. Промышленное моделирование предпо-

лагают обязательную передачу модели заказчику с расчётом на её систематическое применение, т.е. компьютерные промышленные модели сдаются «под ключ». При аналитическом моделировании разрабатываются модели в виде компьютерных тренажеров и игр, необходимые для обучения персонала. При промышленном моделировании сценарии передачи модели заказчику может быть проведено поэтапно:

1. На первом этапе исследование, при котором предусматривается передача заказчику только результатов компьютерных экспериментов; заказчик при этом может вообще не знать, с помощью какого программного продукта проводилось моделирование.

2. На втором этапе заказчику передаётся готовая модель (или библиотека моделей) с расчётом на то, что заказчик будет сам в дальнейшем планировать и проводить компьютерные эксперименты. На этой стадии не предусматривается возможность изменения промышленной модели. На модельной установке представленных в виде файлов с расширением «exe» моделирование можно проводить только варьированием параметров модели и исходных данных.

3. На третьем этапе заказчику передаётся «всё в полном комплекте», т.е. «компьютерное исследование», «готовая модель», программный продукт и вся «техника и технология» создания определенного класса моделей; составной частью исследовательского проекта является обучение заказчика, в результате которого он должен научиться работать с программным продуктом и результатом разработки тренажером и создавать модели хотя бы для определенного класса систем (иногда – на базе специально созданной для этих целей библиотеки модулей).

Учебное моделирование проводится на лабораторных занятиях по дисциплине «Моделирование процессов и систем» или «Компьютерное моделирование», здесь происходит освоение технологий разработки компьютерных моделей.

В данной книге мы выбрали ряд классических задач, изложенных в учебных пособиях [32]. Мы взяли постановку этих задач и привели технологии решения (построения компьютерных моделей) в среде моделирования Rand Model Designer в главах 2 и 3 в целях обучения компьютерному моделированию. Выполнив ряд лабораторных работ, можно освоить технологии на уровне учебного моделирования в этой среде. Лабораторные работы предполагают пошаговое выполнение заданий, которые, в конечном счете, приводят к разработке компьютерной модели в среде Rand Model Designer.

Модернизация этих учебных моделей и проведение исследований на них являются инновационными шагами для студентов в освоении методологий исследования динамических систем в среде Rand Model Designer и могут быть отнесены к уровню научно-исследовательского моделирования. Методологии и технологии научно-исследовательского моделирования динамических систем более подробно изложены в главе 4 и 5.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое моделирование и какие виды моделирования вы знаете?
2. Каковы этапы математического моделирования?
3. Каков процесс построения математической модели?
4. Что такое информационная модель объекта?
5. Какие виды информационных моделей Вы знаете?
6. Как вы представляете аналитическую модель объекта?
7. Что мы понимаем под имитационным моделированием?
8. Какие разновидности имитационного моделирования Вы знаете?
9. Как вы понимаете статистическое моделирование?
10. Что такое дискретно—событийное моделирование?
11. Как вы представляете агентное моделирование?
12. Поясните парадигму моделирования системной динамики и когнитивного моделирования.
13. Дайте определение компьютерной модели.
14. Какие языки программирования общего назначения Вы знаете?
15. Какие языки программирования вы знаете для разработки пользовательского интерфейса?
16. Какие инструменты визуального компьютерного моделирования вы знаете?
17. Опишите парадигму уровней компьютерного моделирования динамических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маликов, Р.Ф. Основы математического моделирования: учеб. пособие / Р.Ф.Маликов. – М: Изд-во «Горячая линия–Телеком», 2010. – 348с. (Профессионально-педагогическое образование). – ISBN 978-5-9912-0123-0.
2. Введение в математическое моделирование: Учебное пособие / Под ред. П.В.Трусова. – Логос, 2004. -440с. ISBN 5-98704-037-Х.
3. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учебник для академического бакалавриата / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 7 -е изд. – М.: Изд-во Юрайт, 2019. – 343 с. ISBN 978-5-9916-3916-3.
4. Беляева М.А. Моделирование систем : конспект лекций : в 2 ч.; ч. 1 / М.А. Беляева. – М.: МГУП имени И.Федорова, 2012. – 188 с.
5. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1968. – 356с.
6. Бусленко, Н.П. Метод статистического моделирования/ Н.П. Бусленко. – М.: Статистика, 1970. – 112 с.
7. Михайлов, Г.А. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло: учеб. Пособие / Г.А.Михайлов, А.В.Войтишек. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 368с. ISBN 978-5-534-11518-5.
8. Тарасевич, Ю.Ю. Математическое и компьютерное моделирование. Вводный курс [Текст]: учеб. пособие / Ю.Ю.Тарасевич. – Изд. 7, стереотип. URSS. – 2019. – 152 с. – ISBN 978-5-9710-6212-7.
9. Шеннон, Роберт Ю. Имитационное моделирование систем - искусство и наука : Пер. с англ. / Под ред. Е.К. Масловского. – М: Мир, 1978. – 418 с.
10. Шрайбер, Т. Дж. Моделирование на GPSS: учеб. пособие/ Т. Дж. Шрайбер. – Изд-во: Машиностроение, 1980. – 592.
11. Кобелев, Н.Б. Имитационное моделирование: учеб. пособие / Н.Б. Кобелев, В.В.Девятков, В.А.Половников. – М.: КУРС: ИНФРА-М, 2014. – 368с. ISBN 978-5-905554-17-9
12. Боев, В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: учеб. пособие / В.Д.Боев. – СПб.: ВHV-Петербург, 2004.–368 с. ISBN 5-94157-515-7
13. Томашевский, В. Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В. Н. Томашевский, Е. Г. Жданова. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с. – ISBN 5-8238-0574-8.

14. Карпов, Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю.Г.Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с. ISBN: 5-94157-148-8
15. Ивашкин, Ю.А. Агентные технологии и мультиагентное моделирование систем: учеб. пособие / Ю.А.Ивашкин. – М.: МФТИ, 2013. – 268с. ISBN 978-5-906828-72-9.
16. Мезенцев, К.Н. Моделирование систем в среде AnyLogic 6.4.1: учеб. пособие / К.Н.Мезенцев. Под редакцией Заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора А.Б.Николаева. Часть 1, 2. – М.: МАДИ. – 2011. – 103с.
17. Сидоренко, В.Н. Системная динамика / В.Н. Сидоренко– М.: Эконом. факультет МГУ, ТЕИС, 1998. – 200 с. ISBN 5-7218-0135-2
18. Толуев, Ю.И. Моделирование и симуляция логистических систем: курс лекций для высших технических учебных заведений / Ю.И.Толуев, С.И.Планковский. – Киев: «Миллениум», 2009. – 85с.
19. Форрестер Д. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика) / Общ. ред. и предисл. Гвишиани Д. М — М.: Прогресс, 1971. — 340 с.
20. Форрестер Д. Динамика развития города. / Под ред. Ю. П. Иванилова [и др.] — М.: Прогресс, 1974. — 286 с.
21. Форрестер Д.. Мировая динамика: Пер. с англ. / Под ред. Д. М. Гвишиани, Н. Н. Моисеева. — М: ООО «Изд-во АСТ. – 2003. – 384 с. ISBN 5-17-019253-3
22. Болотова, Л.С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях: учебник / Л.С. Болотова. – М.: Финансы и статистика, 2012. – 664 с. ISBN 978-5-279-03530-4 (в пер.)
23. Максимов В.И. Когнитивные технологии – от незнания к пониманию / Сб. трудов 1-й Международной конференции «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций», (CASC'2001). – М.: ИПУ РАН, 2001. – Т.1. – С. 4-18.
24. Горелова, Г.В. Исследование слабоструктурированных проблем социально-экономических систем: когнитивный подход / Г.В.Горелова, Е.Н. Захарова, С.А.Радченко. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2006. – 332 с. ISBN: 5-7507-0220-0.
25. Горелова, Г.В. Региональная система образования, методология комплексных исследований / Г.В.Горелова, Н.Х.Джаримов. – Краснодар: Изд-во Печатный двор, 2002. - 360с. ISBN 5-88295-070-8

26. Асанов, А.З. Введение в математическое моделирование динамических систем / А.З. Асанов. – Казань: Изд-во КГУ. – 2008. – 218 с. ISBN 978-5-98180-513-4
27. Модели систем автоматического управления и их элементов: учеб. пособие / С.Т.Кусимов, Б.Г.Ильясов, В.И.Васильев и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 214с.
28. Чикуров, Н.Г. Моделирование систем [Текст]: учеб. пособие / Н.Г. Чикуров. – М.: РИОР: ИНФРА-М, 2013. – 397с. ISBN 978-5-369-01167-6.
29. Дьяконов, В. П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование / В.П.Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с. ISBN: 5-98003-130-8
30. Клиначев, Н. В. Моделирование систем в программе VisSim. Справочная система [Электронный ресурс] / Н.В.Клиначев. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001.
31. Маликов Р.Ф. Практикум по компьютерному моделированию физических явлений и объектов . Учеб. пособие. – Уфа: Изд-во БашГПУ, 2005. – 235 с. ISBN 5-87978-223-9
32. Маликов, Р.Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic: учеб. пособие / Р.Ф.Маликов. – Уфа: Изд-во БашГПУ, 2013. – 295с. ISBN 978-5-87978-862-4
33. Маликов Р.Ф. Практикум по дискретно-событийному моделированию сложных систем в расширенном редакторе GPSS World: практикум. / Р.Ф.Маликов. – Уфа: Изд-во БашГПУ, 2017. – 280с.
34. Усманова А.Р. Формирование научно-исследовательских компетенций инженеров на основе цифровых технологий моделирования / А.Р.Усманова, Р.Ф.Маликов, А.Р.Исхаков // Инженерное образование, вып 26, 2019. – С.56-65.
35. Губин С.В. Информационные технологии в логистике: курс лекций для высших технических учебных заведений / С.В.Губин. – Киев: «Миллениум», 2009. – 60 с.
36. Кознов, Д.В. Языки визуального моделирования: проектирование и визуализация программного обеспечения: учеб. пособие / Д. В. Кознов. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004, - 143 с. ISBN 5-288-03502-4 (в обл.)
37. Кознов Д. В. Основы визуального моделирования / Д. В. Кознов. – М: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 248.с. ISBN 978-5-94774-823-9.

38. Кознов Д.В. Визуальное моделирование информационных e-сервисов в публичной сфере/ Д. В. Кознов. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2014. — 144. ISBN 978-5-288-05567-6 .
39. Авербух, В.Л. Метафоры визуализации // Программирование, 2001, № 5, с. 3-17.
40. Фаулер, М. UML. Основы, 3 е издание / М. Фаулер– Пер. с англ. – СПб: Символ Плюс, 2004 – 192 с. ISBN 5 93286 060 X
41. Кватрани, Т. Rational Rose 2000 и UML. Визуальное моделирование / Т. Кватрани. Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 176 с. ISBN 5-94074-131-2.
42. Буч, Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++ / Г.Буч. – М.: Бином, СПб.: Невский диалект, 1998. – 558 с. ISBN 5-7989-0067-3.
43. Леоненков, А.В. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с использованием UML и IBM Rational Rose / А.В.Леоненков. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 320 с. ISBN: 5-94774-408-2
44. Колесов, Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем / Ю.Б.Колесов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 240 с.
45. Колесов Ю. Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы / Ю.Б.Колесов, Ю.Б.Сениченков. – СПб. : БХВ -Петербург, 2006. – 224 с. ISBN 5-94157-578-5.
46. Колесов, Ю. Б. Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход / Ю.Б.Колесов, Ю.Б.Сениченков. – СПб. : БХВ -Петербург, 2006. – 192 с. ISBN: 5-94157-579-3.
47. Колесов Ю. Б., Математическое моделирование гибридных динамических систем: учеб. пособие / Ю.Б.Колесов, Ю.Б.Сениченков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 236 с. ISBN: 978-5-7422-4183-6.
48. Сениченков Ю. Б. Математическое моделирование сложных динамических систем : сб. заданий / Ю. Б. Сениченков, Н. Б.Ампилова, Е. Л. Тимофеев. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 108 с. ISBN 978-5-7422-5960-2.
49. Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Компьютерный практикум: учеб. пособие / Ю. Б. Сениченков. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 189 с. ISBN 978-5-7422-4020-4

50. Колесов, Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование в среде Rand Model Designer 7: учебно-практическое пособие / Ю.Б.Колесов, Ю.Б.Сениченков. — Москва : Издательство «Проспект», 2016. — 256 с. ISBN 978-5-392-22360-2.
51. Маликов, Р.Ф. Основы систем компьютерного моделирования. Учеб. пособие / Р.Ф.Маликов. — Уфа: Изд-во БГПУ, 2008. — 279с. ISBN 978-5-87978-453-4.
52. Маликов, Р.Ф. Основы разработки компьютерных моделей сложных систем: учеб. пособие / Р.Ф.Маликов. — Уфа: Изд-во БГПУ, 2012. — 256с. ISBN 978-5-87978-829-7.
53. Альсова О.К. Имитационное моделирование систем в среде ExtendSim : учеб. пособие / О. К. Альсова. 2-е изд. — М.: Изд-во Юрайт, 2018. — 115 с. ISBN 978-5-534-06956-3.
54. Девятков, В.В. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO: учеб. пособие / В.В. Девятков, Т.В. Девятков, М.В.Федотов. — М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. 283 с. ISBN 978-5-9558-0595-5.
55. Ивашкин Ю.А. Мультиагентное моделирование в имитационной системе Simplex3: учеб. пособие / Ю.А.Ивашкин. — М. : Лаборатория знаний, 2016. — 350 с. ISBN 978-5-906828-72-9.
56. Мезенцев К.Н. Мультиагентное моделирование в среде NetLogo: учеб. пособие — М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2014. — 169с. ISBN 13: 978-5-8114-1933-3
57. Щербаков, С.М. Имитационное моделирование экономических процессов в системе Agena: учеб. пособие / С.М. Щербаков; Рост. гос. эконом. ун-т (РИНХ). — Ростов н/Д, 2012. — 128 с. ISBN 978-5-7972-1868-5.
58. Маликов, Р.Ф. Компьютерное моделирование физических явлений и объектов / Р.Ф. Маликов, Р.Х. Мустафин. — Уфа, Изд-во БашГПУ, 2003. — 80 с.
59. Самарский А. А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А.Самарский, А.П.Михайлов. — М.: Наука. Физматлит, 1997. — 320 с. ISBN 5-9221-0120-X.
60. Alur, Rajeev, Costas Courcoubetis, Thomas A. Henzinger, and Pei-Hsin Ho. 1993. Hybrid automata: An algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems. In Lecture notes in computer science, edited by R. L. Grossma, A. Nerode, A. P. Ravn, and H. Rischel, vol. 736, pp. 209-29. New York: Springer-Verlag
61. Maler O., Manna Z., Pnueli A.. From timed to hybrid systems. Real Time: Theory in Practice. LNCS 600, 1992, p. 447-484

62. Бромберг, П.В. Матричные методы в теории релейного и импульсного регулирования / П.В.Бромберг . – М.: Наука, 1967. – 323 с.
63. Hezinger T.A. The theory of hybrid systems. In Proceedings of 11th annual symposium on logics in computer science. p. 278-292. IEEE Computer Society Press, 1996.
64. Hybrid Systems. Homepage: <http://www.seas.upenn.edu/>
65. Сениченков, Ю.Б. Численное моделирование гибридных систем / Ю.Б.Сениченков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 206 с. ISBN 5-7422-0730-1.
66. Колесов, Ю.Б. Моделирование систем. Практикум по компьютерному моделированию: учеб. пособие / Ю.Б.Колесов, Ю.Б.Сениченков. – СПб.: БХВ -Петербург, 2007. – 352 с. ISBN 5-94157-580-7.
67. Кулямин, В.В. Технология программирования. Компонентный подход. М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. - 463 с. ISBN 5-94774-544-5
68. Колесов, Ю.Б. Компонентные технологии математического моделирования: учеб. пособие / Ю.Б.Колесов, Ю.Б.Сениченков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 222 с. ISBN 978-5-7422-3997-0
69. Теория бифуркаций / В.И. Арнольд, В.С. Афраймович, Ю.С. Ильяшенко, Л.П. Шильников / – М.: ВИНТИ АН СССР. – Т. 5. "Современные проблемы математики. Фундаментальные направления", 1985. – 218 с.
70. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости / А.А.Андронов, Е.А.Леонтович, И.И.Гордон, А.Г. Майер. – М: Наука,1967.
71. Башкирцева, И. А. Компьютерное моделирование нелинейной динамики: Непрерывные модели : учеб. пособие / И. А. Башкирцева, Т. В .Рязанова, Л. Б . Ряшко. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 84 с. ISBN: 978-5-7996-2046-2
72. Бифуркации отображений: учебно-научное издание / А.П.Кузнецов, А.В.Савин, Ю.В.Седова, Л.В. Тюрюкина. – Саратов: ООО Издательский центр «Наука», 2012. – 196 с. ISBN 978-5-9999-1185-8
73. Кузнецов А.П. Динамические системы и бифуркации: учебно-научное издание / А.П.Кузнецов. – Саратов: ООО Издательский центр «Наука», 2015. – 168 с. ISBN 978-5-9999-2335-6.
74. Кузнецов, А.П. Колебания, катастрофы, бифуркации, хаос / А.П.Кузнецов. – Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2000. – 98 с. ISBN 5-900641-90-2

75. Кондратьева, Л.А. Численно-аналитические методы локализации предельных циклов в математических моделях нелинейной динамики: учеб. пособие / Л.А. Кондратьева. – М.: Доброе слово, 2019. – 48 с.
76. Евсюков, В.Н. Нелинейные системы автоматического управления: учебное пособие / В.Н.Евсюков. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. – 172с.
77. Асланов, В.С. Нелинейная динамика / В.С.Асланов, А.С.Ледков. – Самара: Самар. аэрокосм. ун-т 2010. - 92 с.
78. Мун, Ф. Хаотические колебания: вводный курс для научных работников и инженеров / Ф. Мун. Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 312с.
79. Бифуркация Андронова-Хопфа для потоков и отображений: учебно-методическое пособие / М.И.Болотов, С.В.Гонченко, А.С.Гонченко, Е.А. Гринес, А.О.Казаков, Т.А.Леванова, В.И.Лукьянов. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. – 73 с.
80. Awrejcewicz, Jan. Matematyczne modelowanie systemow / Jan.Awrejcewicz. – Lodz, 2006. – 428s.
81. Инихов, Д.Б. Пакеты моделирования в образовании: современная ситуация и нерешенные проблемы / Д.Б.Инихов, Ю.Б.Колесов, Ю.Б.Сениченков. // Компьютерные инструменты в образовании №6, 2012. – с.44-
82. Инихов, Д.Б. Физическое моделирование в MVStudium / Д.Б.Инихов, Ю.Б.Колесов, Ю.Б.Сениченков // Компьютерные инструменты в образовании, №5, 2007. – с 14-19.
83. Колесов, Ю.Б. Вычислительные эксперименты в пакете RMD. Компьютерные инструменты в образовании №5, 2012. – с.11-24
84. Игнатъев, И.В. Динамика носителей в полупроводниковых квантовых точках / И.В.Игнатъев, И.Э.Козин – СПб.: СПбГУ, 2005. – 126 с. ISBN 5-98340-027-4
85. Kirstaedter, N. Low threshold, large T0 injection-laser emission from (InGa)As quantum dots / N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg et al. // Electronics Letters. – 1994. – Vol.30. – №17. – P. 1416 - 1417.
86. Алферов, Ж. И. Инжекционные лазеры на основе гетеропереходов в системе AlAs-GaAs с низким порогом генерации при комнатной температуре /Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, Е. Л. Портной, М.К. Трукан // ФТП. – 1969. – Т. 3. – С. 1328-1332.
87. Yuan, Z. L. Electrically driven single-photon source / Z. L. Yuan, B. E. Kardynal, R. M. Stevenson, A. J. Shields, et al. // Science. – 2002. – Vol. 295.– P. 102-105

88. O'Brien, D. Sensitivity of quantum-dot semiconductor lasers to optical feedback / D. O'Brien, S. P. Hegarty, G. Huyet, A. V. Uskov // *Optics Letters* – 2004. – Vol. 29. – P.1072-1074.
89. Uskov, A.V. Theory of a self-assembled quantum-dot semiconductor laser with Auger carrier capture: Quantum efficiency and nonlinear gain / A. V. Uskov, Y. Boucher, J. Le Bihan, J. McInerney // *Applied Physics Letters*. – 1998. – Vol.73. – № 11. – P.1499—1501.
90. Markus, A. Simultaneous two-state lasing in quantum-dot lasers. / A. Markus, J.X.Chen, C. Paranthoen, A.Fiore, C. Platz, O. Gauthier-Lafaye // *Applied Physics Letters* . – 2003. – Vol. 82. – № 12 – P. 1818-1820.
91. Abusaa, M. Intradot time scales strongly affect the relaxation dynamics in quantum dot lasers / J. Danckaert, E. A. Viktorov and T. Erneux // *Physical review A* – 2013. – Vol.87. – №6. – P. 063827.
92. Erneux, T. Time scales and relaxation dynamics in quantum-dot lasers / T. Erneux, E. A. Viktorov, P. Mandel // *Physical Review A*. – 2007. – Vol.76. – P. 023819.
93. Lüdge, K. Quantum-Dot Lasers—Desynchronized Nonlinear Dynamics of Electrons and Holes / K. Lüdge, E. Schöll // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2009. – Vol.45. – № 11. – P. 1396-1403.
94. Fiore, A. Differential Gain and Gain Compression in quantum dot lasers / A. Fiore, A. Markus // *IEEE J. Quantum Electron.* – 2007. – Vol.43. – №4. – P. 287-294.
95. Kelleher, B. Lasing state hysteresis in a two-state quantum dot laser via optical injection / B. Kelleher, D. Goulding, B. Tykalewicz, N. Fedorov, I. Dubinkin, S. P. Hegarty, G. Huyet, T. Erneux, E. A. Viktorov // *Proc. SPIE* – 2016. – Vol. 9742. – P. 97420D.
96. Kelleher, B. Two-color bursting oscillations / B. Kelleher, B. Tykalewicz, D. Goulding, N. Fedorov, I. Dubinkin, T. Erneux, E. A. Viktorov // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol.7. – P. 8414.
97. Kelleher, B. Slow passage to bursting effects in an optically injected laser / B. Tykalewicz, D. Goulding, N. Fedorov, I. Dubinkin, T. Erneux, E.A. Viktorov // *European Quantum Electronics Conference* – 2017.
98. Viktorov, E. A. Injection-induced, tunable all-optical gating in a two-state quantum dot laser / I. Dubinkin, N. Fedorov, T. Erneux, B. Tykalewicz, S. P. Hegarty, G. Huyet, D. Goulding, and B. Kelleher // *Optics Letters*. – 2016. – Vol.41. – №15. – P. 3555-3558.

99. Дубинкин, И.Н. Нелинейные и стохастические эффекты в лазерах на квантовых точках. Диссертация на соискание ученой степени кандидата...наук / И.Н. Дубинкин. – Санкт-Петербург, 2018.
100. Zheludev, N.I. The road ahead for metamaterials / N.I. Zheludev // *Science*. – 2010. – Vol. 328. – P. 582–583.
101. Soukoulis, C.M. Optical metamaterials: more bulky and less lossy / C.M. Soukoulis, M. Wegener // *Science*. – 2010. – Vol. 330. – P. 1633–1634.
102. Evers, W.H. Low-Dimensional Semiconductor Superlattices Formed by Geometric Control over Nanocrystal Attachment / W.H. Evers, B. Goris, S. Bals [et al.] // *Nano Lett.* – 2013. – Vol. 13(6). – P. 2317–2323.
103. Liu, W. A two-dimensional conjugated aromatic polymer via C-C coupling reaction / Liu W., Luo Y. [et al.] // *Nat. Chem.* – 2017. – Vol. 9. – P. 563.
104. Baimuratov, A.S. Quantum-dot supercrystals for future nanophotonics / A.S. Baimuratov, [et al.] // *Sci. Rep.* – 2013. – Vol. 3. – P. 1727.
105. Маликов, Р.Ф. Оптическая бистабильность и гистерезис тонкого слоя резонансных излучателей: взаимное влияние неоднородного уширения линии поглощения и локального поля Лоренца / Р.Ф. Маликов, В.А. Малышев // *Опт. и спектр.*, – 2017. – Т. 122. – № 6. – С. 98–106.
106. Malyshev, V.A. Nonlinear optical dynamics of a 2D semiconductor quantum dot super-crystal: Emerging multistability, self-oscillations and chaos (EXCON 2018) / V.A. Malyshev, P.A. Zapatero, A.V. Malyshev, R.F. Malikov, I.V. Ryzhov // *Journal of Physics: Conf. Series* **1220** (2019) 012006.
107. Рыжов, И.В. Монослой квантовых излучателей с дублетом в основном состоянии: перспективная система с точки зрения нелинейной динамики и нанофотоники / И.В. Рыжов, Р.Ф. Маликов, А.В. Малышев, В.А. Малышев // В книге: XIII международные чтения по квантовой оптике (IWQO - 2019). Сборник тезисов. - Москва, 2019. – С. 213-216.
108. Маликов, Р.Ф. Нелинейная динамика суперкристалла трехуровневых λ -излучателей: теория и перспективы практического применения / И.В. Рыжов, Р.Ф. Маликов, В.А. Малышев // IV Международная конференция по оптике неоднородных структур. Сборник научных трудов. Могилев: МГУ им. Кулеша, 2019. –С41-48.
109. Ryzhov, I.V. Nonlinear optical response of a two-dimensional quantum-dot supercrystal: emerging multistability, periodic and aperiodic self-oscillations, chaos, and transient chaos / I.V. Ryzhov, R.F. Malikov, A.V. Malyshev, V.A. Malyshev // *Physical Review A*. 2019. Т. 100. № 3. С. 033820.
110. Байрамдурдыев, Д.Я. Нелинейная оптическая динамика и высокая отражательная способность монослоя трёхуровневых квантовых излучателей с

дублетом в возбуждённом состоянии / Д.Я.Байрамдурдыев, Р.Ф.Маликов,
И.В.Рыжов, В.А.Малышев // ЖЭТФ, 2020, т.158, вып.2(8). – С. 269-281.

Наши книги можно приобрести:

Учебным заведениям и библиотекам:
в отделе по работе с вузами
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: vuz@urait.ru

Частным лицам:
список магазинов смотрите на сайте urait.ru
в разделе «Частным лицам»

Магазинам и корпоративным клиентам:
в отделе продаж
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru

Отзывы об издании присылайте в редакцию
e-mail: gred@urait.ru

Новые издания и дополнительные материалы доступны
на образовательной платформе «Юрайт» urait.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»

Учебное издание

Маликов Рамиль Фарукович

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СРЕДЕ RAND MODEL DESIGNER

Учебное пособие для вузов

Формат 70×100^{1/16}.
Гарнитура «Charter». Печать цифровая.
Усл. печ. л. 15,21.

ООО «Издательство Юрайт»
111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4а.
Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru