

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Московский государственный университет печати имени Ивана Федорова

М.А. Беляева

Моделирование систем

Часть 1

Конспект лекций

для студентов, обучающихся по специальности

220200.65 — Автоматизированные системы

обработки информации и управления

и по направлению

230100.62 — Информатика и вычислительная техника

Москва

2012

УДК 004.414.23

ББК 32.973.202

Б 44

Рецензенты:

Мельников Н.В., д.т.н., проф. кафедры «Информационные системы»
Государственного университета управления;

Марголин Л.Н., к.т.н., доц. кафедры «Информатика и вычислительная
техника» МГУП имени Ивана Федорова

Беляева М.А.

Б 44 Моделирование систем : конспект лекций : в 2 ч.; ч. 1 /
М.А. Беляева; Моск. гос. ун-т печати имени Ивана Федорова. —
М. : МГУП имени Ивана Федорова. — 188 с.

В первой части материалов конспекта лекций по дисциплине «Моделирование систем» отражены классификация и виды моделирования, использованы труды как отечественных, так и зарубежных ученых в области моделирования систем и системного анализа. Приведен обзор инструментальных сред и программная реализация моделей. Показаны примеры моделей, реализованных в различных программных средах.

Конспект лекций предназначен для студентов технических и экономических специальностей, бакалавров, изучающих данную дисциплину, а также может быть полезен для научных сотрудников, магистров, аспирантов.

Печатается в авторской редакции.

УДК 004.414.23

ББК 32.973.202

© Беляева М.А., 2012

© Московский государственный
университет печати
имени Ивана Федорова, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Основные понятия теории моделирования систем	8
1.1. Теория подобия и моделирования	8
1.2. Моделирование в современной науке и практике исследований	9
1.3. Перспективы развития методов и средств моделирования	12
1.4. Понятие сложной системы. Подсистемы и элементы	18
1.5. Структура, функции, переменные, параметры состояния и характеристики большой системы	22
1.6. Модели и их роль в изучении процессов функционирования сложных систем	30
1.7. Классификация моделей	31
1.8. Математическое моделирование систем	43
1.9. Аналитические и имитационные модели	48
1.10. Комбинированные (аналитико-имитационные) модели	50
1.11. Методы машинной реализации моделей	51
Контрольные вопросы	58
2. Формализация и алгоритмизация процессов функционирования систем	60
2.1. Последовательность разработки и компьютерной реализации моделей систем	60
2.2. Построение концептуальной модели системы	66
2.3. Проверка адекватности модели и объекта моделирования	71
2.4. Формы представления логической и функциональной структуры моделей	79
2.5. Пример построения схем моделирующих алгоритмов	80
2.6. Структурно-параметрическое моделирование систем	82
Контрольные вопросы	89

3. Статистическое моделирование систем на ЭВМ.	
Системы массового обслуживания	91
3.1. Стохастические системы и возможности их компьютерного моделирования	91
3.2. Датчики случайных чисел. Метод Монте-Карло	99
3.3. Имитация случайных событий при имитационных экспериментах со стохастическими системами.....	100
3.4. Общая характеристика СМО-моделирования на ЭВМ.....	103
3.5. Примеры систем и сетей массового обслуживания	104
3.6. Аналитические методы расчета характеристик пуассоновских СМО	110
3.7. Моделирование потоков заявок в реальных системах. Моделирование станций обслуживания и очередей.....	112
3.8. Моделирование СМО в пространстве состояний	118
Контрольные вопросы	120
4. Общая концепция интеллектуального агента имитационного моделирования. Агентные технологии и мультиагентная система	122
4.1. Принципы построения имитационных моделей активных систем	122
4.2. Понятие интеллектуального агента	125
4.3. Мультиагентная имитация.....	126
4.4. Агентно-ориентированные технологии ситуационного моделирования больших систем	128
4.5. Моделирование событий	131
4.6. Базисные, мобильные и структурные компоненты имитационных моделей	132
4.7. Инструментальные средства и системы имитационного моделирования в объектно-ориентированных языках программирования в среде WINDOWS	135
Контрольные вопросы	140
5. Обзор программных продуктов для реализации имитационных моделей	142
5.1. Популярные системы имитационного моделирования.....	142
5.2. Среда моделирования AnyLogic	142

5.3. Универсальная имитационная система Simplex3.....	147
5.4. Моделирование на GPSS	148
5.5. Simula.	151
5.6. ARIS Simulation — модуль динамического имитационного моделирования.....	152
5.7. Adams	153
5.8. Пакет визуального моделирования Simulink.....	155
5.9. PowerSim Studio	158
5.10. StarLogo	158
5.11. NetLogo.....	158
5.12. Пакеты прикладных программ моделирования	158
5.13. Arena	159
Контрольные вопросы	159
Приложение	161
Глоссарий.....	180
Список используемой литературы	184

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование — это общепризнанное средство познания действительности, которое состоит из двух этапов разработки модели и ее анализа, а также позволяет исследовать сложные процессы и явления на основе экспериментов не с реальной системой, а с ее моделью.

В повседневной деятельности эксперименты ставятся на реальных системах: либо это экономика страны, отдельная организация или система управления сложными процессами. Зачастую лицо принимающее решение (ЛПР) использует интуитивный метод принятия решений и трудно предсказать динамику поведения системы в целом.

Целью моделирования является принятие адекватных управленческих решений. Компьютерное моделирование становится наиболее актуальным и важным этапом в принятии решений во всех сферах деятельности человека, управлении процессом и получении желаемого результата. Поэтому знание концепций и методов моделирования, принципов построения моделей, и выбора средств их реализации, используя при этом современные программные продукты являются на сегодняшний день необходимыми для поддержки принятия решений руководителем, инженером, менеджером, бизнес-аналитиком и др.

Современные программные среды, такие как *VBA*, *Delphi*, *Any Logic*, *Агента*, *Simula*, *ARIS-simulation*, универсальная имитационная система *Simplex 3*, инструментальные среды *BPWin*, *ARIS toolset* позволяют создавать экранные формы, понятные любому пользователю, показать многофакторный анализ не только в числовой форме, а также графически интерпретировать влияние различных факторов в разрабатываемых моделях на состояние моделируемой системы.

Данный конспект лекций предназначен в помощь студентам в освоении технологией моделирования и работы в программных продуктах, затрагивающей основные аспекты или ключевые мо-

менты моделирования систем, способствующие приобретению умения и навыков в применении методов моделирования, разработке моделей в различных предметных областях и их программной реализации.

В основу составления конспекта лекций по дисциплине «Моделирование систем» положены основополагающие работы и публикации отечественных и зарубежных авторов, в которых изложены теоретические основы, методы и алгоритмы разработки математических и имитационных моделей больших систем различной физической природы.

В работе были использованы труды в области моделирования и разработчика программного продукта имитационной среды *Simplex 3* проф. Б. Шмитда университет Пассау (Германия) [19, 22], труды научной школы проф. Ю.А. Ивашкина в области системного анализа и моделей, реализованных в имитационных системах *Simplex 3*, внедрение данного программного продукта в Российских вузах [21, 23, 29], труды Б.Я. Советова [7, 8], И.П. Бусленко [4], в конспект лекций включены материалы курсовых и дипломных работ студентов, выполненные под руководством автора [1–3].

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ

1.1. Теория подобия и моделирования

Моделирование — это процесс замещения изучаемого объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели, т. е. моделирование, может быть еще определено как представление объекта моделью для получения информации об этом объекте путем проведения экспериментов с его моделью.

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 не имеет места, поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы модель достаточно хорошо отображала исследуемую сторону функционирования объекта.

Научной основой моделирования служит теория аналогии, в частном случае — физического и аналогового моделирования — теория подобия, в которой основным понятием является — понятие аналогии — сходство объектов по их качественным и количественным признакам. Основные виды качественной аналогии:

- химическая;
- физическая;
- кибернетическая.

Все эти виды объединяются понятием обобщенной аналогии — абстракцией. Она выражает особого рода соответствие между сопоставляемыми объектами, между моделью и прототипом.

Кибернетическая аналогия — подобие функций, ведущее к установлению структурного сходства сравниваемых систем управления и нахождения способа (алгоритма) управления, обеспечивающего достижение оптимума цели путем преобразования потоков информации. Константой подобия в данном случае часто служит алгоритм оптимального управления.

Физическая аналогия — подобие при наличии физического аналога. Константы подобия — безразмерные величины, а результат исследования предполагает раскрытие физического смысла самих уравнений.

Основным видом количественной аналогии является понятие математической аналогии. Это аналогия формы уравнений и аналогия соотношений между переменными в уравнениях оригинала и модели.

Частные случаи математической аналогии — геометрическая, временная. Геометрическая представляет собой подобие пространственных пропорций частей объекта, подобие геометрических образов. Временная — подобие функции времени, при котором константа подобия показывает, в каком отношении к ней находятся такие параметры, как период, задержка и т. д.

1.2. Моделирование в современной науке и практике исследований

Имитационное моделирование — метод, позволяющий строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности. Такую модель можно «проиграть» во времени как для одного испытания, так и заданного их множества. При этом результаты будут определяться случайным характером процессов. По этим данным можно получить достаточно устойчивую статистику.

Имитационное моделирование — это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему и с ней проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе. Экспериментирование с моделью называют имитацией (имитация — это постижение сути явления, не прибегая к экспериментам на реальном объекте).

Имитационное моделирование — это частный случай математического моделирования. Существует класс объектов, для кото-

рых по различным причинам не разработаны аналитические модели, либо не разработаны методы решения полученной модели. В этом случае математическая модель заменяется имитатором или имитационной моделью.

Имитационная модель — логико-математическое описание объекта, которое может быть использовано для экспериментирования на компьютере в целях проектирования, анализа и оценки функционирования объекта.

Применение имитационного моделирования

К имитационному моделированию прибегают, когда:

- дорого или невозможно экспериментировать на реальном объекте;
- невозможно построить аналитическую модель: в системе есть время, причинные связи, последствие, нелинейности, стохастические (случайные) переменные;
- необходимо симитировать поведение системы во времени.

Цель имитационного моделирования — воспроизведение поведения исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между ее элементами или другими словами — разработке симулятора (англ. simulation modeling) исследуемой предметной области для проведения различных экспериментов.

Имитационное моделирование позволяет имитировать поведение системы во времени. Причем плюсом является то, что временем в модели можно управлять: замедлять в случае с быстропротекающими процессами и ускорять для моделирования систем с медленной изменчивостью. Можно имитировать поведение тех объектов, реальные эксперименты с которыми дороги, невозможны или опасны.

Имитация, как метод решения нетривиальных задач, получила начальное развитие в связи с созданием ЭВМ в 1950-х — 1960-х годах.

Можно выделить две разновидности имитации:

- Метод Монте-Карло (метод статистических испытаний).
- Метод имитационного моделирования (статистическое моделирование).

Виды имитационного моделирования:

- Агентное моделирование — относительно новое (1990-е — 2000-е гг.) направление в имитационном моделировании, которое используется для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами (как в других парадигмах моделирования), а наоборот. Когда эти глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности членов группы. Цель агентных моделей — получить представление об этих глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении ее отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе. Агент — некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться.
- Дискретно-событийное моделирование — подход к моделированию, предлагающий абстрагироваться от непрерывной природы событий и рассматривать только основные события моделируемой системы, такие как: «ожидание», «обработка заказа», «движение с грузом», «разгрузка» и другие. Дискретно-событийное моделирование наиболее развито и имеет огромную сферу приложений — от логистики и систем массового обслуживания до транспортных и производственных систем. Этот вид моделирования наиболее подходит для моделирования производственных процессов. Основан Джеффри Гордоном в 1960-х годах.
- Системная динамика — парадигма моделирования, где для исследуемой системы строятся графические диаграммы причинных связей и глобальных влияний одних параметров на другие во времени, а затем созданная на основе этих диаграмм модель имитируется на компьютере. 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 бизнес-процессов, развития города, модели про-

изводства, динамики популяции, экологии и развития эпидемии. Метод основан Джеем Форрестером в 1950-х годах.

Области применения:

- Бизнес процессы.
- Боевые действия.
- Динамика населения.
- Дорожное движение.
- ИТ-инфраструктура.
- Математическое моделирование исторических процессов.
- Логистика.
- Пешеходная динамика.
- Производство.
- Рынок и конкуренция.
- Сервисные центры.
- Цепочки поставок.
- Уличное движение.
- Управление проектами.
- Экономика здравоохранения.
- Экосистема.
- Информационная безопасность.

1.3. Перспективы развития методов и средств моделирования

Модели базовых информационных технологий в образовании

Для логического уровня информатики характерно совершенствование существующих, создание и развитие *новых информационных технологий*. Получили развитие как теория, так и практика информационных технологий. Развивается методология, совершенствуются средства информационных технологий. Уже в настоящее время могут быть выделены базовые информационные процессы и *информационные технологии*.

В рамках базовых технологий получают развитие конкретные технологии, решающие задачи в выбранных предметных областях.

Переход к информационному обществу заставляет задуматься о готовности выпускников учебных заведений к жизни и к труду в обществе XXI века. Учитывая, что уже в настоящее время скорости преобразования технологий производства стали опережать темпы смены поколений, оказывается необходимым не только совершенствование и дополнительная подготовка, но и неоднократное освоение новых видов деятельности в течение трудовой жизни.

Поэтому в информационном обществе встает проблема обучения, и непрерывное образование становится составной частью жизни каждого человека. В этих условиях информатизация означает изменение всей образовательной системы с ее ориентацией на новую информационную культуру. Освоение новой информационной культуры может в значительной степени реализовываться за счет внедрения в учебный процесс, управление образованием и в повседневную жизнь перспективных информационных технологий.

Прежде всего следует обратить особое внимание на проблему обеспечения сферы образования теорией и методикой как разработки, так и эффективного применения новых средств информационных технологий.

Теория информационных технологий должна определить модели базовых информационных процессов, связанных с получением, сбором, передачей, обработкой, хранением, накоплением и представлением информации. Особое место занимают *модели формализации и представления знаний*.

Весьма актуальным представляется выделение базовых информационных технологий, к которым уже в настоящее время можно отнести технологии распределенного хранения и обработки, офисные технологии, мультимедиа технологии, геоинформационные технологии, технологии защиты информации, CASE-технологии, телекоммуникационные технологии. На основе базовых разрабатываются *прикладные информационные технологии* по областям применения, позволяющие получать конкретные продукты соответствующего назначения в виде средств, систем, сред.

В рамках указанных технологий в образовании уже в настоящее время получили широкое применение:

- компьютерные программы и *обучающие системы*, представляющие собой *электронные учебники*, учебные пособия, тренажеры, лабораторные практикумы, системы тестирования знаний и квалификации, выполненные на различных типах машинных носителей;
- системы на базе *мультимедиа-технологии*, построенные с применением видеотехники, накопителей на CD-ROM и реализуемые на ПЭВМ;
- *интеллектуальные обучающие экспертные системы*, которые специализируются по конкретным областям применения и имеют практическое значение как в процессе обучения, так и в учебных исследованиях;
- информационные среды на основе *баз данных и знаний*, позволяющие осуществить как прямой, так и удаленный доступ к информационным ресурсам;
- телекоммуникационные системы, реализующие электронную почту, телеконференции и т. д., и позволяющие осуществить выход в мировые коммуникационные сети;
- *электронные настольные типографии*, позволяющие в индивидуальном режиме с высокой скоростью осуществить производство учебных пособий и документов на различных носителях;
- *электронные библиотеки* как распределенного, так и централизованного характера, позволяющие по-новому реализовать доступ учащихся к мировым информационным ресурсам;
- *геоинформационные системы*, которые базируются на технологии объединения компьютерной картографии и систем управления базами данных. В итоге удастся создать многослойные электронные карты, опорный слой которых описывает базовые явления или ситуации, а каждый последующий — задает один из аспектов, процессов или явлений;
- *системы защиты информации* различной ориентации — (от несанкционированного доступа при хранении информации, от искажений при передаче информации, от подслушивания и т. д.).

Перспективы применения информационных технологий

Методически новые информационные технологии в образовании должны быть проработаны с ориентацией на конкретное применение. Часть технологий может поддерживать учебный процесс (лекционные и практические занятия), другие технологии способны эффективно поддержать разработку новых учебников и учебных пособий. Информационные технологии помогут также эффективно организовать проведение экспериментально-исследовательских работ как в школе, так и в вузе. Особую значимость информационные технологии приобретают при самостоятельной работе учащихся на домашнем компьютере с использованием *современных методов моделирования*. Какие же новые возможности открываются при внедрении современных информационных технологий в образование? На основе мультимедиа технологии появляется возможность создавать учебники, учебные пособия и другие методические материалы на машинном носителе, которые могут быть разделены на некоторые группы:

- *Учебники*, представляющие собой текстовое изложение материала с большим количеством иллюстраций, которые могут быть установлены на сервере и переданы через сеть на домашний компьютер. При ограниченном количестве материала такой учебник может быть реализован в прямом доступе пользователя к серверу.
- *Учебники с высокой динамикой* иллюстративного материала, выполненные на CD-ROM. Наряду с основным материалом они содержат средства интерактивного доступа, средства анимации и мультимедиа, а также видеоизображения, в динамике демонстрирующие принципы и способы реализации отдельных процессов и явлений. Такие учебники могут иметь не только образовательное, но и художественное назначение. Огромный объем памяти носителя информации позволяет реализовывать на одном оптическом диске энциклопедию, справочник, путеводитель и т. д.
- *Современные компьютерные обучающие системы* для проведения учебно-исследовательских работ. Они реализовывают моделирование как процессов, так и явлений, т. е. созда-

ют новую учебную компьютерную среду, в которой обучаемый является активным, и может сам вести учебный процесс.

- *Системы виртуальной реальности*, в которых учащийся становится участником компьютерной модели, отображающей окружающий мир. Для грамотного использования мультимедиа продуктов этого типа крайне важно изучение их психологических особенностей и негативных воздействий на обучаемого.

- *Системы дистанционного обучения*. В сложных социально экономических условиях дистанционное образование становится особенно актуальным для отдаленных регионов, для людей с малой подвижностью, а также при самообразовании и самостоятельной работе учащихся. Эффективная реализация дистанционного обучения возможна лишь при целенаправленной программе создания высококачественных мультимедиа продуктов учебного назначения по фундаментальным, естественнонаучным, общепрофессиональным и специальным дисциплинам.

Формирование новой информационной культуры должно базироваться прежде всего на определенном уровне обучения в школе, а поэтому особое внимание следует уделить содержанию программы базового курса информатики, который, с одной стороны, должен быть согласован по содержанию с последующим обучением в ВУЗе, а с другой, должен поддерживать и остальные предметы школьного образования. В курс информатики уже в настоящее время закладываются сведения по моделированию процессов и явлений, по методологии формирования информационных моделей окружающего мира.

В создании информационной культуры нового общества положена идея компьютерной поддержки каждого изучаемого предмета.

Важным является принцип непрерывности информационной подготовки учащихся, который должен соблюдаться в уровневом вузовском образовании: бакалавриат и магистратура. К информационной подготовке можно отнести обучение методологии и средствам моделирования. Формирование информационной среды Российского образования требует решения проблем:

1. Создание единой системы программно и аппаратно совместимых *средств* вычислительной *техники и техники связи*, используемой в непрерывном учебном процессе.

2. Выходом в *Интернет* образовательных организаций.

3. Формирование *единой информационной среды* непрерывного образования с созданием баз данных учебной и методической литературы. Организация обмена информационными ресурсами Российской образовательной системы с международной в области фундаментальных и прикладных достижений.

4. Совершенствование *инструментальных средств* непрерывного образования, ориентированных на использование и разработку электронных учебников и методических материалов, программные и аппаратные средства создания компьютерных обучающих систем, средства технологии разработки мультимедиа продуктов, геоинформационных систем и т. д.

5. Организация *инфраструктуры* информатизации образования как информатизации общества в целом. Включает создание новых, тиражирование и внедрение существующих информационных технологий в непрерывное образование.

Идеологически при информатизации образования необходимо учитывать ряд принципиальных позиций:

- Эволюционное развитие сложившейся методологии образования за счет явных преимуществ новых информационных технологий, а именно, возможность наглядного, динамичного представления информатизации с использованием видеоизображений и звука, применения удаленного доступа для ознакомления с внешним и внесения собственного информационного ресурса в образовании.
- Непрерывность и преемственность электронного образования на всех уровнях обучения, начиная от школьного, затем бакалавриата, магистратуры и до послевузовского. Непрерывность должна обеспечиваться электронной поддержкой всех дисциплин учебного процесса.
- Выбор методики и средств обучения для выявления творческих индивидуальных способностей учащихся на основе информационных технологий и телекоммуникационных систем.

- Формирование методически и научно-обоснованной системы базового образования на основе компьютерных технологий. Одним из реальных путей решения проблемы в целом является формирование и реализация региональных научно-технических программ с долевым федеральным и местным бюджетным финансированием при дополнительном использовании внебюджетных средств. Предметом специальных исследований коллективов Высшей школы должны стать содержание, методы и средства развития образования как опережающей системы в будущем информационном обществе. При этом фундаментальное место занимают *методы и средства моделирования*, на основе которых можно предсказать будущее. Только при устойчивом развитии цивилизации мы можем надеяться на последовательное становление ноосферы как сферы разума. Будущее развитие человечества должно быть управляемым и в этом аспекте, несомненно, управляемым должно быть и развитие образования.

1.4. Понятие сложной системы. Подсистемы и элементы

Сложная система («большая система») — составной объект, части которого можно рассматривать как системы, закономерно объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями.

Основные понятия теории систем

Термины «теория систем» и «системный анализ», «системный подход», на протяжении 30 и более лет используются в области человеческой деятельности.

Почти более века назад Д.И. Менделеев, используя свое системное мышление, разработал таблицу химических элементов, систематизировал всю живую и неживую природу по различным признакам и свойствам, сам не зная того, что им была разработана модель, представленная в табличной форме и использован был системный анализ, про который в науке тогда еще не было и речи.

При системном подходе объект исследования представляется как система. Само понятие «система» может быть относимо к од-

ному из методологических понятий, поскольку рассмотрение объекта исследуется как система или отказ от такого рассмотрения и зависит от задачи исследования и самого исследователя.

Существует много определений системы:

- система есть комплекс элементов, находящийся во взаимодействии;
- система — это множество объектов вместе с отношениями этих объектов;
- система — множество элементов, находящихся в отношениях или связях друг с другом, образующих целостность или органическое единство.

Термины «отношение» и «взаимодействие» используются в самом широком смысле, включая весь набор родственных понятий, таких как ограничение, структура, организационная связь, соединение, зависимость и т. д.

Таким образом, система S представляет собой упорядоченную пару $S = (A, R)$, где A — множество элементов; R — множество отношений между A -элементами.

Система — это полный, целостный набор элементов (компонентов), взаимосвязанных и взаимодействующих между собой так, чтобы могла реализоваться функция системы. Уровни в системе могут быть соподчинены друг другу, образуя иерархию связей.

Исследование объекта как системы предполагает использование ряда систем представлений (категорий), среди которых основными являются:

- структурное представление связано с выделением элементов системы и связей между ними;
- функциональное представление систем — выделение совокупности функций (целенаправленных действий) системы и ее компонентов направленное на достижение определенной цели;
- макроскопическое представление — понимание системы как нерасчлененного целого, взаимодействующего с внешней средой;
- микроскопическое представление основано на рассмотрении системы как совокупности взаимосвязанных элементов. Оно предполагает раскрытие структуры системы;

- иерархическое представление основано на понятии подсистемы, получаемом при разложении (декомпозиции) системы, обладающей системными свойствами, которые следует отличать от ее элемента — неделимого на более мелкие части (с точки зрения решаемой задачи или по логическому заключению). Система может быть представлена в виде совокупностей подсистем различных уровней, составляющую системную иерархию, которая замыкается снизу только элементами;
- процессуальное представление предполагает понимание системного объекта как динамического объекта, характеризующегося последовательностью его состояний во времени.

Объект

Объектом познания является часть реального мира, которая выделяется и воспринимается как единое целое в течение длительного времени. Объект может быть материальным и абстрактным, естественным и искусственным. Реально объект обладает бесконечным набором свойств различной природы. Практически в процессе познания взаимодействие осуществляется с ограниченным множеством свойств, лежащих в пределах возможности их восприятия и необходимости для цели познания. Поэтому система как образ объекта задается на конечном множестве отобранных для наблюдения свойств.

Внешняя среда

Понятие «система» возникает там и тогда, где и когда мы материально или умозрительно проводим замкнутую границу между неограниченным или некоторым ограниченным множеством элементов. Те элементы с их соответствующей взаимной обусловленностью, которые попадают внутрь, — образуют систему. Элементы, которые остались за пределами границы, образуют множество, называемое в теории систем «системным окружением» или просто «окружением», или «внешней средой». Из рассуждений вытекает, что нелегко рассматривать систему без ее внешней среды.

Система формирует и проявляет свои свойства в процессе взаимодействия с окружением, являясь при этом ведущим компонентом этого воздействия.

В зависимости от воздействия на окружение и характер взаимодействия с другими системами, функции систем можно расположить по возрастающему рангу следующим образом:

- пассивное существование;
- материал для других систем;
- обслуживание систем более высокого порядка;
- противостояние другим системам (выживание);
- поглощение других систем (экспансия);
- преобразование других систем и сред (активная роль).

Всякая система может рассматриваться, с одной стороны, как подсистема более высокого порядка (надсистемы), а с другой, как надсистема системы более низкого порядка (подсистема). Например, система «производственный цех» входит как подсистема в систему более высокого ранга — «фирма». В свою очередь, надсистема «фирма» может являться подсистемой «корпорации». Обычно в качестве подсистем фигурирует более или менее самостоятельные части систем, выделяемые по определенным признакам, обладающие относительной самостоятельностью, определенной степенью свободы.

Компонент — любая часть системы, вступающая в определенные отношения с другими частями (подсистемами, элементами).

Элементом системы является часть системы с однозначно определенными свойствами, выполняющими определенные функции и не подлежащие дальнейшему разбиению в рамках решаемой задачи (с точки зрения исследователя).

Понятия «элемент», «подсистема», «система взаимопреобразуемая», могут рассматриваться как элементы системы более высокого порядка (метасистема), а элементы при углубленном анализе, как система. То обстоятельство, что любая подсистема является одновременно и относительно самостоятельной системой приводит к двум аспектам изучения систем: на макро- и микроуровнях.

При изучении процессов и явлений на макроуровне основное внимание уделяется взаимодействию системы с внешней средой. Причем системы более высокого уровня можно рассматривать как часть внешней среды. При таком подходе главными факторами являются целевая функция системы (цель) и условия ее функциони-

рования. При этом элементы системы изучаются с точки зрения организации их в единое целое, влияние на функции системы в целом. На микроуровне основными становятся внутренние характеристики системы, характер взаимодействия элементов между собой, их свойства и условия функционирования.

1.5. Структура, функции, переменные, параметры состояния и характеристики большой системы

Свойства систем

Состоянием системы называется — совокупность существенных свойств, которыми система обладает в каждый момент времени.

Под свойством понимают те аспекты объекта, которые обуславливают его отличие от других объектов или сходство с ними и проявляющуюся при взаимодействии с другими объектами.

Характеристика — отражение некоторых свойств системы. Из определения «системы» следует, что главным свойством системы является целостность, единство, достигаемое посредством определенных взаимосвязей и взаимодействий элементов системы, и проявляющееся в возникновении новых свойств, которыми элементы системы не обладают.

Эмерджентность — (от англ. emerge — возникать, появляться) — это степень несводимости свойств системы к свойствам элементов, из которых она состоит. Эмерджентность — свойство систем, обуславливающее появление новых свойств и качеств, не присущих элементам, входящих в состав системы. Эмерджентность — принцип противоположный редукционизму, который утверждает, что целое можно изучать, расчленив его на части и затем, определяя их свойства, определить свойства целого. Свойству эмерджентности близко свойство целостности системы. Однако их нельзя отождествлять.

Целостность системы означает, что каждый элемент системы вносит вклад в реализацию целевой функции системы. Целостность и эмерджентность — интегративные свойства системы. Наличие интегративных свойств является одной из важнейших черт системы. Це-

лостность проявляется в том, что система обладает собственной закономерностью функциональности, собственной целью.

Организованность — сложное свойство систем, заключающееся в наличии структуры и функционирования (поведения). Непременной принадлежностью систем является их компоненты, именно те структурные образования, из которых состоит целое и без чего оно не возможно.

Функциональность — это проявление определенных свойств (функций) при взаимодействии с внешней средой. Здесь же определяется цель (назначение системы) как желаемый конечный результат.

Структурность — это упорядоченность системы, определенный набор и расположение элементов со связями между ними. Между функцией и структурой системы существует взаимосвязь, как между философскими категориями содержанием и формой. Изменение содержания (функций) влечет за собой изменение формы (структуры), но и наоборот.

Важным свойством системы является наличие поведения — действия, изменений, функционирования и т. д.

Считается, что это поведение системы связано со средой (окружающей), то есть с другими системами, с которыми она входит в контакт или вступает в определенные взаимоотношения.

Процесс целенаправленного изменения во времени состояния системы называется **поведением**. В отличие от управления, когда изменение состояния системы достигается за счет внешних воздействий, поведение реализуется исключительно самой системой, исходя из собственных целей.

Поведение каждой системы объясняется структурой систем низшего порядка, из которых состоит данная система, и наличием признаков равновесия (гомеостаза). В соответствии с признаком равновесия система имеет определенное состояние (состояния), которое является для нее предпочтительным. Поэтому поведение систем описывается в терминах восстановления этих состояний, когда они нарушаются в результате изменения окружающей среды.

Еще одним свойством является свойство роста (развития). Развитие можно рассматривать как составляющую часть поведения (при этом важнейшим).

Одним из первичных, а следовательно, основополагающих атрибутов системного подхода является недопустимость рассмотрения объекта вне его **развития**, под которым понимается необратимое, направленное, закономерное изменение материи и сознания. В результате возникает новое качество или состояние объекта. отождествление (может быть и не совсем строгое) терминов «развитие» и «движение» позволяет выразиться в таком смысле, что вне развития немислимо существование материи, в данном случае — системы. Наивно представлять себе развитие, происходящее стихийно. В неоглядном множестве процессов, кажущихся на первый взгляд чем-то вроде броуновского (случайного, хаотичного) движения, при пристальном внимании и изучении вначале как бы проявляются контуры тенденций, а затем и довольно устойчивые закономерности. Эти закономерности по природе своей действуют объективно, то есть не зависят от того, желаем ли мы их проявления или нет. Незнание законов и закономерностей развития — это блуждание в потемках.

Поведение системы определяется характером реакции на внешние воздействия.

Фундаментальным свойством систем является устойчивость, то есть способность системы противостоять внешним возмущающим воздействиям. От нее зависит продолжительность жизни системы.

Простые системы имеют пассивные формы устойчивости: прочность, сбалансированность, регулируемость, гомеостаз. А для сложных — определяющими являются активные формы: надежность, живучесть и адаптируемость.

Если перечисленные формы устойчивости простых систем (кроме прочности) касаются их поведения, то определяющая форма устойчивости сложных систем носит в основном структурный характер.

Надежность — свойство сохранения структуры систем, несмотря на гибель отдельных ее элементов с помощью их замены или дублирования, а живучесть — как активное подавление вредных качеств. Таким образом, надежность является более пассивной формой, чем живучесть.

Адаптируемость — свойство изменять поведение или структуру с целью сохранения, улучшения или приобретения новых качеств в условиях изменения внешней среды. Обязательным условием возможности адаптации является наличие обратных связей.

Всякая реальная система существует в среде. Связь между ними бывает настолько тесной, что определять границу между ними становится сложно. Поэтому выделение системы из среды связано с той или иной степенью идеализации.

Можно выделить два аспекта взаимодействия:

- во многих случаях принимается характер обмена между системой и средой (веществом, энергией, информацией);
- среда обычно является источником неопределенности для систем.

Воздействие среды может быть пассивным либо активным (антагонистическим, целенаправленно противодействующее системе). Поэтому в общем случае среду следует рассматривать не только безразличную, но и антагонистическую по отношению к исследуемой системе.

Классификация систем

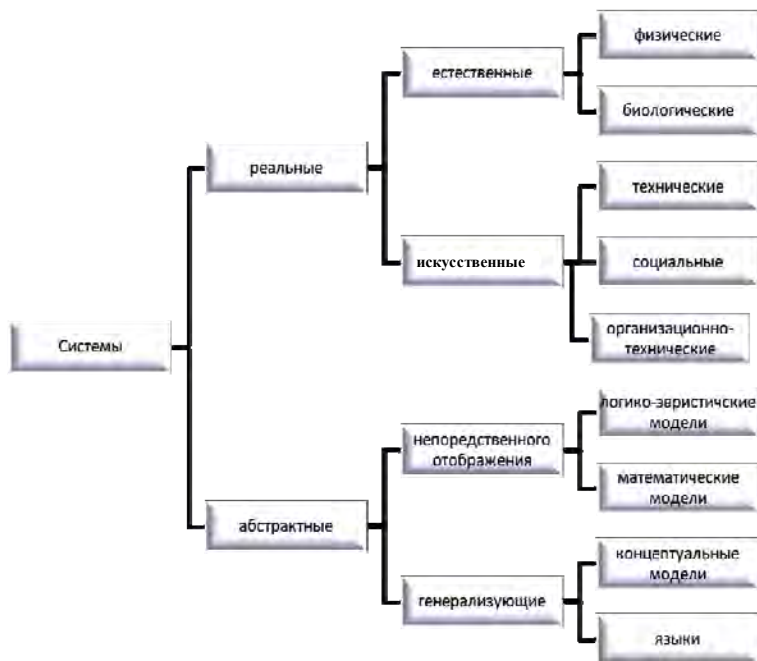


Рис. 1.5.1. Классификация систем

Таблица 1.5.1

Классификация систем

Основание (критерий) классификации	Классы систем
По взаимодействию с внешней средой	Открытые Закрытые Комбинированные
По структуре	Простые Сложные Большие
По характеру функций	Специализированные Многофункциональные (универсальные)
По характеру развития	Стабильные Развивающиеся
По степени организованности	Хорошо организованные Плохо организованные (диффузные)
По сложности поведения	Автоматические Решающие Самоорганизующиеся Предвидящие Превращающиеся
По характеру связи между элементами	Детерминированные Стохастические
По характеру структуры управления	Централизованные Децентрализованные
По назначению	Производящие Управляющие Обслуживающие

Классификацией называется разбиение на классы по наиболее существенным признакам. Под классом понимается совокупность объектов, обладающих некоторыми признаками общности. Признак (или совокупность признаков) является основанием (критерием) классификации (классификация систем приведена на рис. 1.5.1).

Система может быть охарактеризована одним или несколькими признаками и соответственно ей может быть найдено место в различных классификациях, каждая из которых может быть полезной при выборе методологии исследования. Обычно цель классификации ограничить выбор подходов к отображению систем, выработать язык описания, подходящий для соответствующего класса.

По содержанию различают реальные (материальные), объективно существующие, и абстрактные (концептуальные, идеальные) системы, являющиеся продуктом мышления.

Реальные системы делятся на естественные (природные системы) и искусственные (антропогенные).

Естественные системы: системы неживой (физические, химические) и живой (биологические) природы.

Искусственные системы: создаются человечеством для своих нужд или образуются в результате целенаправленных усилий. Искусственные делятся на технические (техничко-экономические) и социальные (общественные).

Техническая система спроектирована и изготовлена человеком в определенных целях. К социальным системам относятся различные системы человеческого общества.

Выделение систем, состоящих из одних только технических устройств почти всегда условно, поскольку они не способны вырабатывать свое состояние. Эти системы выступают как части более крупных, включающие людей — организационно-технических систем.

Организационная система, для эффективного функционирования которой существенным фактором является способ организации взаимодействия людей с технической подсистемой, называется человеко-машинной системой. Примеры человеко-машинных систем: ЭВМ-пользователь, поезд-машинист, самолет-летчик и т. д.

Отличием технических систем по сравнению с произвольной совокупностью объектов или по сравнению с отдельными элементами является конструктивность, ориентированность и взаимосвязанность составных элементов и целенаправленность.

От структуры зависит также способность системы к перераспределению функций в случае полного или частичного отхода отдельных элементов, а, следовательно, надежность и живучесть системы при заданных характеристиках ее элементов.

Абстрактные системы являются результатом отражения действительности (реальных систем) в мозге человека. Абстрактные (идеальные) системы объективны по источнику происхождения, поскольку их первоисточником является объективно существующая действительность. Абстрактные системы разделяют на

системы непосредственного отображения (отражающие определенные аспекты реальных систем) и системы генерализирующего (обобщающего) отображения. К первым относятся математические и эвристические модели, а ко вторым — концептуальные системы (теории методологического построения) и языки.

На основе понятия внешней среды системы разделяются на: открытые, закрытые (замкнутые, изолированные) и комбинированные. Деление систем на открытые и закрытые связано с их характерными признаками: возможность сохранения свойств при наличии внешних воздействий. Если система нечувствительна к внешним воздействиям ее можно считать закрытой. В противном случае — открытой.

Открытой называется система, которая взаимодействует с окружающей средой. Все реальные системы являются открытыми. Открытая система является частью более общей системы или нескольких систем.

Открытая система связана со средой определенными коммуникациями, то есть сетью внешних связей системы. Выделение внешних связей и описание механизмов взаимодействия «система-среда» является центральной задачей теории открытых систем. Рассмотрение открытых систем позволяет расширить понятие структуры системы. Для открытых систем оно включает не только внутренние связи между элементами, но и внешние связи со средой. При описании структуры внешние коммуникационные каналы стараются разделить на входные (по которым среда воздействует на систему) и выходные (наоборот). Совокупность элементов этих каналов, принадлежащих собственной системе называются входными и выходными полюсами системы. У открытых систем, по крайней мере, один элемент имеет связь с внешней средой, по меньшей мере, один входной полюс и один выходной, которыми она связана с внешней средой.

Для каждой системы связи со всеми подчиненными ей подсистемами и между последним, являются внутренними, а все остальные — внешними. Связи между системами и внешней средой также, как и между элементами системы, носят, как правило, направленный характер. Необходимо отметить, что в любой реальной системе в

силу законов диалектики о всеобщей связи явлений число всех взаимосвязей огромно, так что учесть и исследовать абсолютно все связи невозможно, поэтому их число искусственно ограничивают. Вместе с тем, учитывать все возможные связи нецелесообразно, так как среди них есть много несущественных, практически не влияющих на функционирование системы и количество полученных решений (с точки зрения решаемых задач). Если изменение характеристик связи, ее исключение (полный разрыв) приводят к значительному ухудшению работы системы, снижению эффективности, то такая связь — существенна. Одна из важнейших задач исследователя — выделить существенные для рассмотрения системы в условиях решаемой задачи связи и отделить их от несущественных. В связи с тем, что входные и выходные полюса системы не всегда удастся четко выделить, приходится прибегать к определенной идеализации действий. Наибольшая идеализация имеет место при рассмотрении закрытой системы.

Закрытой называется система, которая не взаимодействует со средой или взаимодействует со средой строго определенным образом. В первом случае предполагается, что система не имеет входных полюсов, а во втором, что входные полюса есть, но воздействие среды носит неизменный характер и полностью (заранее) известно. Очевидно, что при последнем предположении указанные воздействия могут быть отнесены собственно к системе, и ее можно рассматривать, как закрытую. Для закрытой системы, любой ее элемент имеет связи только с элементами самой системы.

Разумеется, закрытые системы представляют собой некоторую абстракцию реальной ситуации, так как, строго говоря, изолированных систем не существует. Однако, очевидно, что упрощения в описании системы, заключающиеся в отказе от внешних связей, может привести к полезным результатам, упростить исследование системы. Все реальные системы тесно или слабо связаны с внешней средой — открытые. Если временный разрыв или изменение характерных внешних связей не вызывает отклонения в функционировании системы сверх установленных заранее пределов, то система связана с внешней средой слабо. В противном случае — тесно.

Комбинированные системы содержат открытые и закрытые подсистемы. Наличие комбинированных систем свидетельствует о сложной комбинации открытой и закрытой подсистем.

В зависимости от структуры и пространственно-временных свойств системы делятся на простые, сложные и большие.

Простые — системы, не имеющие разветвленных структур, состоящие из небольшого количества взаимосвязей и небольшого количества элементов. Такие элементы служат для выполнения простейших функций, в них нельзя выделить иерархические уровни. Отличительной особенностью простых систем является детерминированность (четкая определенность) номенклатуры, числа элементов и связей как внутри системы, так и со средой.

Сложные — характеризуются большим числом элементов и внутренних связей, их неоднородностью и разнокачественностью, структурным разнообразием, выполняют сложную функцию или ряд функций. Компоненты сложных систем могут рассматриваться как подсистемы, каждая из которых может быть детализирована еще более простыми подсистемами и т. д. до тех пор, пока не будет получен элемент. Система называется сложной, если ее познание требует совместного привлечения многих моделей теорий, а в некоторых случаях многих научных дисциплин, а также учета неопределенности вероятностного и невероятностного характера. Наиболее характерным проявлением этого определения является многомодельность.

1.6. Модели и их роль в изучении процессов функционирования сложных систем

Большое число задач связано с исследованием сложных систем, таких, которые включают множество элементов, каждый из которых представляет собой достаточно сложную систему, и эти системы тесно взаимосвязаны с внешней средой. Изучение таких систем в естественных условиях ограничено их сложностью, а иногда бывает невозможным ввиду того, что нельзя провести натурный эксперимент или повторить тот или иной эксперимент. В этих условиях порой единственным возможным методом иссле-

дования является моделирование (физическое, логическое, математическое). Без модели нет познания. Любая гипотеза — это модель. И правильность гипотезы о будущем состоянии объекта зависит от того, насколько правильно определили параметры исследуемого объекта и их взаимосвязи между собой и внешней средой. Необходимо построение математических моделей развития конкретных систем (биологических, экологических, экономических, социальных и т. п.).

Математические модели любых систем могут быть двух типов — эмпирические и теоретические. Эмпирические модели — это математические выражения, аппроксимирующие (с использованием тех или иных критериев приближения) экспериментальные данные о зависимости параметров состояния системы от значений параметров, влияющих на них факторов. Для эмпирических математических моделей не требуется получения никаких представлений о строении и внутреннем механизме связей в системе.

Теоретические модели систем строятся на основании синтеза обобщенных представлений об отдельных слагающих их процессах и явлениях, основываясь на фундаментальных законах, описывающих поведение вещества, энергии, информации. Теоретическая модель описывает абстрактную систему, и для первоначального вывода ее соотношений не требуется данных о наблюдениях за параметрами конкретной системы.

1.7. Классификация моделей

Одним из основных признаков классификации видов моделирования можно отметить **степень полноты модели**, и разделить модели в соответствии с этим признаком 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 неполное подобие модели изучаемому объекту. В основе приближенного моделирования лежит приближенное подобие, при котором некоторые стороны функционирования реального объекта не моделируются совсем.

Классификация видов моделирования может быть проведена по разным основаниям. Один из вариантов классификации приведен на рис. 1.7.1.

В соответствии с классификационным признаком полноты моделирование делится на: полное, неполное, приближенное. При **полном** моделировании модели идентичны объекту во времени и пространстве. Для **неполного** моделирования эта идентичность не сохраняется. В основе **приближенного** моделирования лежит подобие, при котором некоторые стороны реального объекта не моделируются совсем. Теория подобия утверждает, что абсолютное подобие возможно лишь при замене одного объекта другим точно таким же. Поэтому при моделировании абсолютное подобие не имеет места. Вполне достаточно чтобы модель хорошо отображала только исследуемый аспект системы.

Например, для оценки помехоустойчивости дискретных каналов передачи информации функциональная и информационная модели системы могут не разрабатываться. Для достижения цели моделирования вполне достаточна событийная модель, описываемая матрицей условных вероятностей переходов i -го символа алфавита в j -й.

В зависимости от типа носителя и сигнатуры модели различаются следующие виды моделирования: детерминированное и стохастическое, статическое и динамическое, дискретное, непрерывное и дискретно-непрерывное.

Детерминированное моделирование отображает процессы, в которых предполагается отсутствие случайных воздействий.

Стохастическое моделирование учитывает вероятностные процессы и события.

Статическое моделирование служит для описания состояния объекта в фиксированный момент времени, а динамическое — для исследования объекта во времени. При этом оперируют аналоговыми (непрерывными), дискретными и смешанными моделями.

В зависимости от формы реализации носителя и сигнатуры моделирование классифицируется на мысленное и реальное.

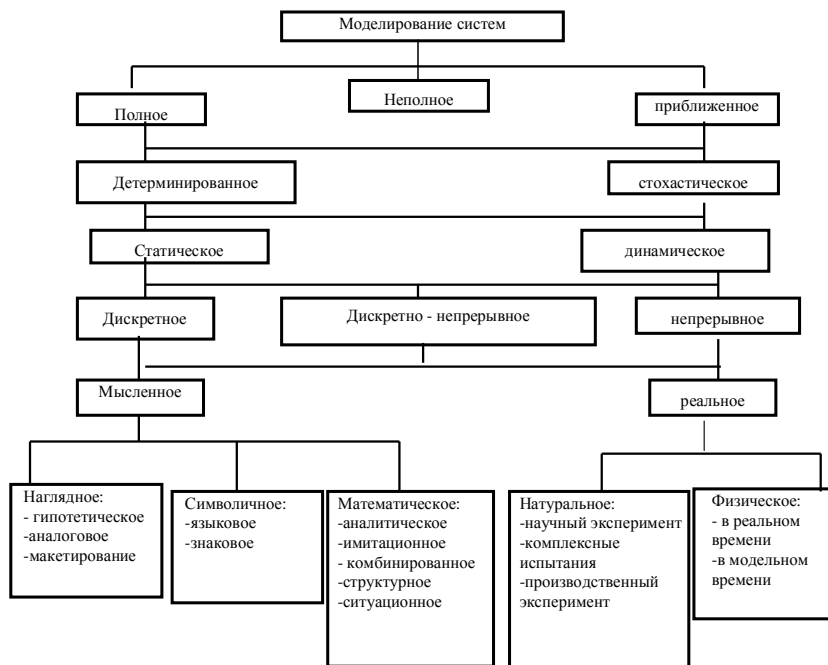


Рис. 1.7.1. Пример классификации видов моделирования

Мысленное моделирование применяется тогда, когда модели не реализуемы в заданном интервале времени либо отсутствуют условия для их физического создания (например, ситуация микромира). Мысленное моделирование реальных систем реализуется в виде наглядного, символического и математического. Для представления функциональных, информационных и событийных моделей этого вида моделирования разработано значительное количество средств и методов.

При **наглядном** моделировании на базе представлений человека о реальных объектах создаются наглядные модели, отображающие явления и процессы, протекающие в объекте. Примером таких моделей являются учебные плакаты, рисунки, схемы, диаграммы.

В основу **гипотетического** моделирования закладывается гипотеза о закономерностях протекания процесса в реальном объек-

те, которая отражает уровень знаний исследователя об объекте и базируется на причинно-следственных связях между входом и выходом изучаемого объекта. Этот вид моделирования используется, когда знаний об объекте недостаточно для построения формальных моделей. Аналоговое моделирование основывается на применении аналогий различных уровней. Для достаточно простых объектов наивысшим уровнем является полная аналогия. С усложнением системы используются аналогии последующих уровней, когда аналоговая модель отображает несколько (или только одну) сторон функционирования объекта.

Макетирование применяется, когда протекающие в реальном объекте процессы не поддаются физическому моделированию или могут предшествовать проведению других видов моделирования. В основе построения мысленных макетов также лежат аналогии, обычно базирующиеся на причинно-следственных связях между явлениями и процессами в объекте.

Символическое моделирование представляет собой искусственный процесс создания логического объекта, который замещает реальный процесс и выражает его основные свойства с помощью определенной системы знаков и символов.

В основе **языкового** моделирования лежит некоторый тезаурус, который образуется из набора понятий исследуемой предметной области, причем этот набор должен быть фиксированным. Под тезаурусом понимается словарь, отражающий связи между словами или иными элементами данного языка, предназначенный для поиска слов по их смыслу. Традиционный тезаурус состоит из двух частей: списка слов и устойчивых словосочетаний, сгруппированных по смысловым (тематическим) рубрикам; алфавитного словаря ключевых слов, задающих классы условной эквивалентности, указателя отношений между ключевыми словами, где для каждого слова указаны соответствующие рубрики. Такое построение позволяет определить семантические (смысловые) отношения иерархического (род/вид) и неиерархического (синонимия, антонимия, ассоциации) типа. Между тезаурусом и обычным словарем имеются принципиальные различия. Тезаурус — словарь, который очищен от неоднозначности, то есть в нем каждому слову может

соответствовать лишь единственное понятие, хотя в обычном словаре одному слову может соответствовать несколько понятий. Если ввести условное обозначение отдельных понятий, то есть знаки, а также определенные операции между этими знаками, то можно реализовать знаковое моделирование и с помощью знаков отображать набор понятий — составлять отдельные цепочки из слов и предложений. Используя операции объединения, пересечения и дополнения теории множеств, можно в отдельных символах дать описание какого-то реального объекта.

Математическое моделирование — это процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью. В принципе, для исследования характеристик любой системы математическими методами, включая и машинные, должна быть обязательно проведена формализация этого процесса, то есть построена математическая модель. Вид математической модели зависит как от природы реального объекта, так и от задач исследования объекта, от требуемой достоверности и точности решения задачи. Любая математическая модель, как и всякая другая, описывает реальный объект с некоторой степенью приближения. Для представления математических моделей могут использоваться различные формы записи. Основными являются инвариантная, аналитическая, алгоритмическая и схемная (графическая). **Инвариантная форма** — запись соотношений модели с помощью традиционного математического языка безотносительно к методу решения уравнений модели. В этом случае модель может быть представлена как совокупность входов, выходов, переменных состояния и глобальных уравнений системы. Аналитическая форма — запись модели в виде результата решения исходных уравнений модели. Обычно модели в аналитической форме представляют собой явные выражения выходных параметров как функций входов и переменных состояния.

Для **аналитического** моделирования характерно то, что в основном моделируется только функциональный аспект системы. При этом глобальные уравнения системы, описывающие закон (алгоритм) ее функционирования, записываются в виде некоторых

аналитических соотношений (алгебраических, интегродифференциальных, конечноразностных и т. д.) или логических условий. Аналитическая модель исследуется несколькими методами:

- аналитическим, когда стремятся получить в общем виде явные зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными состояния системы;
- численным, когда, не умея решать уравнения в общем виде, стремятся получить числовые результаты при конкретных начальных данных (напомним, что такие модели называются цифровыми);
- качественным, когда, не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения (например, оценить устойчивость решения).

В настоящее время распространены компьютерные методы исследования характеристик процесса функционирования сложных систем. Для реализации математической модели на ЭВМ необходимо построить соответствующий моделирующий алгоритм. **Алгоритмическая форма** — запись соотношений модели и выбранного численного метода решения в форме алгоритма. Среди алгоритмических моделей важный класс составляют имитационные модели, предназначенные для имитации физических или информационных процессов при различных внешних воздействиях. Собственно имитацию названных процессов называют имитационным моделированием.

При **имитационном** моделировании воспроизводится алгоритм функционирования системы во времени — поведение системы, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы. Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и не-

прерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия и другие, которые часто создают трудности при аналитических исследованиях. В настоящее время имитационное моделирование — наиболее эффективный метод исследования систем, а часто и единственный практически доступный метод получения информации о поведении системы, особенно на этапе ее проектирования.

В имитационном моделировании различают метод статистических испытаний (Монте-Карло) и метод статистического моделирования.

Метод Монте-Карло — численный метод, который применяется для моделирования случайных величин и функций, вероятностные характеристики которых совпадают с решениями аналитических задач. Состоит в многократном воспроизведении процессов, являющихся реализациями случайных величин и функций, с последующей обработкой информации методами математической статистики. Если этот прием применяется для машинной имитации в целях исследования характеристик процессов функционирования систем, подверженных случайным воздействиям, то такой метод называется методом статистического моделирования.

Метод имитационного моделирования применяется для оценки вариантов структуры системы, эффективности различных алгоритмов управления системой, влияния изменения различных параметров системы.

Имитационное моделирование может быть положено в основу структурного, алгоритмического и параметрического синтеза систем, когда требуется создать систему с заданными характеристиками при определенных ограничениях.

Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования. При построении комбинированных моделей производится предварительная декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие подпроцессы, и для тех из них, где это возможно, используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели. Такой подход дает возможность охватить качественно новые клас-

сы систем, которые не могут быть исследованы с использованием аналитического или имитационного моделирования в отдельности.

Информационное (кибернетическое) моделирование связано с исследованием моделей, в которых отсутствует непосредственное подобие физических процессов, происходящих в моделях, реальным процессам. В этом случае стремятся отобразить лишь некоторую функцию, рассматривают реальный объект как «черный ящик», имеющий ряд входов и выходов, и моделируют некоторые связи между выходами и входами.

Таким образом, в основе информационных (кибернетических) моделей лежит отражение некоторых информационных процессов управления, что позволяет оценить поведение реального объекта. Для построения модели в этом случае необходимо выделить исследуемую функцию реального объекта, попытаться формализовать эту функцию в виде некоторых операторов связи между входом и выходом и воспроизвести данную функцию на имитационной модели, причем на совершенно другом математическом языке и, естественно, иной физической реализации процесса. Так, например, экспертные системы являются моделями ЛПР.

Структурное моделирование системного анализа базируется на некоторых специфических особенностях структур определенного вида, которые используются как средство исследования систем или служат для разработки на их основе специфических подходов к моделированию с применением других методов формализованного представления систем (теоретико-множественных, лингвистических, кибернетических и т. п.). Развитием структурного моделирования является объектно-ориентированное моделирование. Структурное моделирование системного анализа включает:

- методы сетевого моделирования;
- сочетание методов структуризации с лингвистическими;
- структурный подход в направлении формализации построения и исследования структур разного типа (иерархических, матричных, произвольных графов) на основе теоретико-множественных представлений и понятия номинальной шкалы теории измерений.

При этом термин «структура модели» может применяться как к функциям, так и к элементам системы. Соответствующие структуры называются функциональными и морфологическими. Объектно-ориентированное моделирование объединяет структуры обоих типов в иерархию классов, включающих как элементы, так и функции.

В структурном моделировании в настоящее время сформировалась новая технология CASE. Аббревиатура CASE соответствует двум направлениям использования CASE-систем. Первое: Computer-Aided Software Engineering — автоматизированное проектирование программного обеспечения. CASE-системы часто называют инструментальными средами быстрой разработки программного обеспечения (RAD — Rapid Application Development). Второе: Computer-Aided System Engineering — направленно на поддержку концептуального моделирования сложных систем, в частности, менее структурированных в основном, BPR-систем (Business Process Reengineering). В целом CASE-технология представляет собой совокупность методологий анализа, проектирования, разработки и сопровождения сложных автоматизированных систем, поддерживаемую комплексом взаимосвязанных средств автоматизации.

CASE — инструментарий для системных аналитиков, разработчиков и программистов, позволяющий автоматизировать процесс проектирования и разработки сложных систем, в том числе и программного обеспечения.

Ситуационное моделирование опирается на модельную теорию мышления, в рамках которой можно описать основные механизмы регулирования процессов принятия решений. В центре модельной теории мышления лежит представление о формировании в структурах мозга информационной модели объекта и внешнего мира. Эта информация воспринимается человеком на базе уже имеющихся у него знаний и опыта. Целесообразное поведение человека строится путем формирования целевой ситуации и мысленного преобразования исходной ситуации в целевую. Основой построения модели является описание объекта в виде совокупности элементов, связанных между собой определенными отношениями,

отображающими семантику предметной области. Модель объекта имеет многоуровневую структуру и представляет собой тот информационный контекст, на фоне которого протекают процессы управления. Чем богаче информационная модель объекта и выше возможности манипулирования ею, тем лучше и многообразнее качество принимаемых решений при управлении.

При **реальном** моделировании используется возможность исследования характеристик либо на реальном объекте целиком, либо на его части. Такие исследования проводятся как на объектах, работающих в нормальных режимах, так и при организации специальных режимов для оценки интересующих исследователя характеристик (при других значениях переменных и параметров, в другом масштабе времени и т. д.). Реальное моделирование является наиболее адекватным, но его возможности ограничены.

Натурным моделированием называют проведение исследования на реальном объекте с последующей обработкой результатов эксперимента на основе теории подобия. Натурное моделирование подразделяется на научный эксперимент, комплексные испытания и производственный эксперимент. **Научный эксперимент** характеризуется широким использованием средств автоматизации, применением весьма разнообразных средств обработки информации, возможностью вмешательства человека в процесс проведения эксперимента. Одна из разновидностей эксперимента — **комплексные испытания**, в процессе которых вследствие повторения испытаний объектов в целом (или больших частей системы) выявляются общие закономерности о характеристиках качества, надежности этих объектов. В этом случае моделирование осуществляется путем обработки и обобщения сведений о группе однородных явлений. Наряду со специально организованными испытаниями возможна реализация натурного моделирования путем обобщения опыта, накопленного в ходе производственного процесса, то есть можно говорить о **производственном эксперименте**. Здесь на базе теории подобия обрабатывают статистический материал по производственному процессу и получают его обобщенные характеристики. Необходимо помнить про отличие эксперимента от реального протекания процесса. Оно заключается в

том, что в эксперименте могут появиться отдельные критические ситуации и определиться границы устойчивости процесса. В ходе эксперимента вводятся новые факторы, возмущающие воздействия в процесс функционирования объекта. Также видом реального моделирования является **физическое**, отличающееся от натурного тем, что исследование проводится в установках, которые сохраняют природу явлений и обладают физическим подобием. В процессе физического моделирования задаются некоторые характеристики внешней среды и исследуется поведение либо реального объекта, либо его модели при заданных или создаваемых искусственно воздействиях внешней среды. Физическое моделирование может протекать в реальном и модельном (псевдореальном) масштабах времени или рассматриваться без учета времени. В последнем случае изучению подлежат так называемые «замороженные» процессы, фиксируемые в некоторый момент времени.

Физические модели. В основу классификации положена степень абстрагирования модели от оригинала. Предварительно все модели можно подразделить на 2 группы — физические и абстрактные (математические).

Физической моделью обычно называют систему, эквивалентную или подобную оригиналу, но возможно имеющую другую физическую природу. Виды физических моделей:

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

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

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

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

Аналоговые модели называют системы, имеющие физическую природу, отличающуюся от оригинала, но сходные с оригиналом процессы функционирования. Для создания аналоговой модели требуется наличие математического описания изучаемой системы. В качестве аналоговых моделей используются механические, гидравлические, пневматические и электрические системы. Аналоговое моделирование используется при исследовании средства ВТ на уровне логических элементов и электрических цепей, а так же на системном уровне, когда функционирование системы описывается например, дифференциальными или алгебраическими уравнениями.

Математические модели. Математические модели представляют собой формализованное представление системы с помощью абстрактного языка, с помощью математических соотношений, отражающих процесс функционирования системы. Для составления математических моделей можно использовать любые математические средства — алгебраическое, дифференциальное, интегральное исчисление, теорию множеств, теорию алгоритмов и т. д. По существу вся математика создана для составления и исследования моделей объектов и процессов. К средствам абстрактного описания систем относятся также языки химических формул, схем, чертежей, карт, диаграмм и т. п. Выбор вида модели определяется особенностями изучаемой системы и целями моделирования, так как исследование модели позволяет получить ответы на определенную группу вопросов. Для получения другой информации может потребоваться модель другого вида. Математические модели можно классифицировать на детерминированные и вероятностные, аналитические, численные и имитационные.

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

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

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

1.8. Математическое моделирование систем

Математическая модель выражает существенные черты объекта или процесса языком уравнений и других математических средств. Собственно говоря, сама математика обязана своим существованием тому, что она пытается отразить, то есть промоделировать, на своем специфическом языке закономерности окружающего мира. Путь математического моделирования в наше время гораздо более всеобъемлющ, нежели моделирования натурального. Математическое моделирование получило интенсивное развитие с появлением ЭВМ, однако метод зародился одновременно с математикой тысячи лет назад.

Математическое моделирование не всегда сопровождается компьютерной поддержкой. Прежде чем создать математическую модель, делают все возможное для аналитического исследования модели. Аналитические решения (то есть представленные формулами, выражающими результаты исследования через исходные

данные) обычно удобнее и информативнее численных. Возможности аналитических методов решения сложных математических задач, однако, очень ограничены и, как правило, эти методы гораздо сложнее численных. В данной главе доминируют численные методы, реализуемые на компьютерах. Это связано с тем, что моделирование здесь рассматривается под углом зрения компьютерных (информационных) технологий. Такой подход несколько сужает возможности метода в целом; его достоинство — некоторое снижение барьера необходимой математической подготовки (хотя, разумеется, и в численные методы при профессиональном занятии математическим моделированием приходится углубляться настолько, что при этом требуется значительное математическое образование). Наконец, отметим, что понятия «аналитическое решение» и «компьютерное решение» отнюдь не противостоят друг другу, так как компьютеры при математическом моделировании используются не только для численных расчетов, но и для аналитических преобразований; результат аналитического исследования математической модели часто выражен очень сложными уравнениями, для этого дифференциально-интегральные уравнения приводятся к численной реализации.

Математическая модель представляет собой формализованное описание системы (или операции) на некотором абстрактном языке, например, в виде совокупности математических соотношений или схемы алгоритма, то есть такое математическое описание, которое обеспечивает имитацию работы систем или устройств на уровне, достаточно близком к их реальному поведению, получаемому при натурных испытаниях систем или устройств. Любая математическая модель описывает реальный объект, явление или процесс с некоторой степенью приближения к действительности. Вид математической модели зависит как от природы реального объекта, так и от задач исследования.

Математическое моделирование общественных, экономических, биологических и физических явлений, объектов, систем и различных устройств является одним из важнейших средств познания природы и проектирования самых разнообразных систем и устройств, прогнозирования системы в целом.

Целью математического моделирования является анализ реальных процессов математическими методами. Математическое моделирование для исследования характеристик систем можно разделить на аналитическое, имитационное и комбинированное. В свою очередь, математические модели делятся на имитационные и аналитические.

Сущность построения математической модели состоит в том, что реальная система упрощается, схематизируется и описывается с помощью того или иного математического аппарата. Можно выделить следующие **основные этапы построения моделей**:

1. Содержательное описание моделируемого объекта

Объекты моделирования описываются с позиций системного подхода. Исходя из цели исследования устанавливаются: совокупность элементов, взаимосвязи между элементами, возможные состояния каждого элемента, существенные характеристики состояний и отношения между ними. Например, фиксируется, что если значение одного параметра возрастает, то значение другого — убывает и т. п. Вопросы, связанные с полнотой и единственностью выбора характеристик, не рассматриваются. Естественно, в таком словесном описании возможны логические противоречия, неопределенности. Это исходная естественно-научная концепция исследуемого объекта. Такое предварительное, приближенное представление системы называют концептуальной моделью. Для того чтобы содержательное описание служило хорошей основой для последующей формализации, требуется обстоятельно изучить моделируемый объект. Нередко естественное стремление ускорить разработку модели уводит исследователя от данного этапа непосредственно к решению формальных вопросов. В результате построенная без достаточного содержательного базиса модель оказывается непригодной к использованию. На этом этапе моделирования широко применяются качественные методы описания систем, знаковые и языковые модели.

2. Формализация операций. Формализация сводится к следующему:

На основе содержательного описания определяется исходное множество характеристик системы. Для выделения существенных

характеристик необходим хотя бы приближенный анализ каждой из них. При проведении анализа опираются на постановку задачи и понимание природы исследуемой системы. После исключения несущественных характеристик выделяют управляемые и неуправляемые параметры и производят символизацию. Затем определяется система ограничений на значения управляемых параметров. Если ограничения не носят принципиальный характер, то ими пренебрегают.

Дальнейшие действия связаны с формированием целевой функции модели. В соответствии с известными положениями выбираются показатели исхода операции и определяется примерный вид функции полезности на исходах. Если функция полезности близка к пороговой (или монотонной), то оценка эффективности решений возможна непосредственно по показателям исхода операции. В этом случае необходимо выбрать способ свертки показателей (способ перехода от множества показателей к одному обобщенному показателю) и произвести саму свертку. По свертке показателей формируются критерий эффективности и целевая функция.

Если при качественном анализе вида функции полезности окажется, что ее нельзя считать пороговой (монотонной), прямая оценка эффективности решений через показатели исхода операции неправомерна. Необходимо определять функцию полезности и уже на ее основе вести формирование критерия эффективности и целевой функции.

В целом замена содержательного описания формальным — это итеративный процесс.

3. Проверка адекватности модели

Требование адекватности находится в противоречии с требованием простоты, и это нужно учитывать при проверке модели на адекватность. Исходный вариант модели предварительно проверяется по следующим основным аспектам:

- Все ли существенные параметры включены в модель?
- Нет ли в модели несущественных параметров?
- Правильно ли отражены функциональные связи между параметрами?

- Правильно ли определены ограничения на значения параметров?

Для проверки рекомендуется привлекать специалистов, которые не принимали участия в разработке модели. Они могут более объективно рассмотреть модель и заметить ее слабые стороны, чем ее разработчики. Такая предварительная проверка модели позволяет выявить грубые ошибки. После этого приступают к реализации модели и проведению исследований. Полученные результаты моделирования подвергаются анализу на соответствие известным свойствам исследуемого объекта. Для установления соответствия создаваемой модели оригиналу используются следующие пути:

- сравнение результатов моделирования с отдельными экспериментальными результатами, полученными при одинаковых условиях;
- использование других близких моделей;
- сопоставление структуры и функционирования модели с прототипом.

Главным путем проверки адекватности модели исследуемому объекту выступает практика. Однако она требует накопления статистики, которая далеко не всегда бывает достаточной для получения надежных данных.

Для многих моделей первые два приема в меньшей степени. В этом случае остается один путь: заключение о подобии модели и прототипа делать на основе сопоставления их структур и реализуемых функций. Такие заключения не носят формального характера, поскольку основываются на опыте и интуиции исследователя.

По результатам проверки модели на адекватность принимается решение о возможности ее практического использования или о проведении корректировки.

Корректировка модели. При корректировке модели могут уточняться существенные параметры, ограничения на значения управляемых параметров, показатели исхода операции, связи показателей исхода операции с существенными параметрами, критерий эффективности. После внесения изменений в модель вновь выполняется оценка адекватности.

Оптимизация модели. Сущность оптимизации моделей состоит в их упрощении при заданном уровне адекватности. Основными показателями, по которым возможна оптимизация модели, выступают время и затраты средств для проведения исследований на ней. В основе оптимизации лежит возможность преобразования моделей из одной формы в другую. Преобразование может выполняться либо с использованием математических методов, либо эвристическим путем.

1.9. Аналитические и имитационные модели

Аналитическое моделирование — это функционирование элементов системы, подчиненных определенным законам, которые записываются в виде некоторых функциональных соотношений (алгебраических, интегральных, дифференциальных, конечно-разностных и т. п.) или логических условий.

Аналитическая модель может быть исследована следующими методами: аналитическим, явные зависимости для искомых характеристик; численным, уравнения приводятся к численной реализации, для получения численных результатов при конкретных начальных данных; качественным, не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения.

Полное исследование процесса функционирования системы можно провести, когда известны явные зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными. Такие зависимости удастся получить только для сравнительно простых систем. При усложнении систем исследование их аналитическим методом наталкивается на значительные трудности, которые часто бывают непреодолимыми. Поэтому, желая использовать аналитический метод, в этом случае идут на существенное упрощение первоначальной модели, чтобы иметь возможность изучить хотя бы общие свойства системы. Такое исследование на упрощенной модели аналитическим методом помогает получить ориентировочные результаты для определения более точных оценок другими методами.

Численный метод позволяет исследовать (по сравнению с аналитическим методом) более широкий класс систем, но при этом полученные решения носят частный характер. Численный метод особенно эффективен при использовании ЭВМ. В отдельных случаях исследования системы могут удовлетворить и те выводы, которые можно сделать при использовании качественного метода анализа математической модели. Такие качественные методы широко используются, например, в теории автоматического управления для оценки эффективности различных вариантов систем управления.

При **имитационном моделировании** реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы. Преимуществом имитационного моделирования (по сравнению с аналитическим) 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., которые часто создают трудности при аналитических исследованиях. В настоящее время имитационное моделирование — наиболее эффективный метод исследования больших систем, а часто и единственный, практически доступный метод получения информации о поведении системы, особенно на этапе ее проектирования. Если результаты, полученные при воспроизведении на имитационной модели процесса функционирования системы, являются случайными величинами и функциями, то для определения характеристик процесса требуется многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой данных и в качестве метода машинной реализации имитационной модели следует использовать метод статистического моделирования.

1.10. Комбинированные (аналитико-имитационные) модели

Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование при анализе и синтезе систем позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования. При построении комбинированных моделей проводится предварительная декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие подпроцессы и для тех из них, где это возможно, используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели.

При реальном моделировании используется возможность исследования различных характеристик либо на реальном объекте целиком, либо на его части. Реальное моделирование является наиболее адекватным, но при этом его возможности с учетом особенностей реальных объектов ограничены.

Натурным моделированием называют проведение исследования на реальном объекте с последующей обработкой результатов эксперимента на основе теории подобия. При функционировании объекта в соответствии с поставленной целью удастся выявить закономерности протекания реального процесса. Такие разновидности натурного эксперимента, как производственный эксперимент и комплексные испытания, обладают высокой степенью достоверности. Отличие эксперимента от реального протекания процесса заключается в том, что в нем могут появиться отдельные критические ситуации и определяться границы устойчивости процесса.

Одна из разновидностей эксперимента — комплексные испытания, которые также можно отнести к натурному моделированию, когда вследствие повторения испытаний изделий выявляются общие закономерности о надежности этих изделий, о характеристиках качества и т. д. В этом случае моделирование осуществляется путем обработки и обобщения сведений, проходящих в группе однородных явлений.

Наряду со специально организованными испытаниями возможна реализация натурного моделирования путем обобщения опыта, накопленного в ходе производственного процесса, то есть можно говорить о **производственном эксперименте**. На базе тео-

рии подобия обрабатывают статистический материал по производственному процессу и получают его обобщенные характеристики.

Физическое моделирование отличается от натурного тем, что исследование проводится на установках, которые сохраняют природу явлений и обладают физическим подобием. В процессе физического моделирования задаются некоторые характеристики внешней среды и исследуется поведение либо реального объекта, либо его модели при заданных или создаваемых искусственно воздействиях внешней среды. Физическое моделирование может протекать в **реальном** и **нереальном** (псевдореальном) масштабах времени, а также может рассматриваться без учета времени. С точки зрения математического описания объекта и в зависимости от его характера модели можно разделить на модели аналоговые (непрерывные), цифровые (дискретные) и аналого-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 может быть описана уравнениями, связывающими непрерывные и дискретные величины

1.11. Методы машинной реализации моделей

Обеспечение качества функционирования больших систем, связанное с необходимостью изучения протекания стохастических процессов в исследуемых и проектируемых системах позволяет проводить комплекс теоретических и экспериментальных исследований, взаимно дополняющих друг друга. Эффективность экспериментальных исследований сложных систем оказывается крайне низкой, поскольку проведение натурных экспериментов с реальной системой либо требует больших материальных затрат и значительного времени, либо вообще практически невозможно (например, на этапе проектирования, когда реальная система отсутствует). Эффективность теоретических исследований с практической точки зрения в полной мере проявляется лишь тогда, ко-

гда их результаты с требуемой степенью точности и достоверности могут быть представлены в виде аналитических соотношений или моделирующих алгоритмов, пригодных для получения соответствующих характеристик процесса функционирования исследуемых систем.

Средства моделирования систем

Появление современных ЭВМ было решающим условием широкого внедрения аналитических методов в исследование сложных систем. Стало казаться, что модели и методы, например математического программирования, станут практическим инструментом решения задач управления в больших системах. Действительно, были достигнуты значительные успехи в создании новых математических методов решения этих задач, однако математическое программирование так и не стало практическим инструментом исследования процесса функционирования сложных систем, так как модели математического программирования оказались слишком грубыми и несовершенными для их эффективного использования. Необходимость учета стохастических свойств системы, недетерминированности исходной информации, наличия корреляционных связей между большим числом переменных и параметров, характеризующих процессы в системах, приводят к построению сложных математических моделей, которые не могут быть применены в инженерной практике при исследовании таких систем аналитическим методом. Пригодные для практических расчетов аналитические соотношения удается получить лишь при упрощающих предположениях, обычно существенно искажающих фактическую картину исследуемого процесса. Поэтому в последнее время все острее ощущается потребность в разработке методов, которые дали бы возможность уже на этапе проектирования систем исследовать более адекватные модели. Указанные обстоятельства приводят к тому, что при исследовании больших систем все шире применяют методы имитационного моделирования.

Наиболее конструктивным средством решения инженерных задач на базе моделирования в настоящее время стали ЭВМ. Современные ЭВМ можно разделить на две группы: универсальные, прежде всего предназначенные для выполнения расчетных работ,

и управляющие, позволяющие проводить не только расчетные работы, но прежде всего приспособленные для управления объектами в реальном масштабе времени. Управляющие ЭВМ могут быть использованы как для управления технологическим процессом, экспериментом, так и для реализации различных имитационных моделей. В зависимости от того, удастся ли построить достаточно точную математическую модель реального процесса, или вследствие сложности объекта не удастся проникнуть в глубь функциональных связей реального объекта и описать их какими-то аналитическими соотношениями, можно рассматривать два основных пути использования ЭВМ: как средства расчета по полученным аналитическим моделям и как средства имитационного моделирования.

Для аналитической модели, которая точно отображает исследуемую сторону функционирования реального физического объекта, перед ЭВМ стоит задача расчета характеристик системы по каким-либо математическим соотношениям при подстановке числовых значений. В этом направлении вычислительные машины обладают возможностями, практически зависящими от порядка решаемого уравнения и от требований к скорости решения, причем могут быть использованы как ЭВМ, так и АВМ.

При использовании ЭВМ разрабатывается алгоритм расчета характеристик, в соответствии с которым составляются программы (либо генерируются с помощью пакета прикладных программ), дающие возможность осуществлять расчеты по требуемым аналитическим соотношениям. Основная задача исследователя заключается в том, чтобы попытаться описать поведение реального объекта одной из известных математических моделей.

Перспективно сочетание ЭВМ и АВМ, то есть использование гибридных средств вычислительной техники — гибридных вычислительных комплексов (ГВК), что в ряде случаев значительно ускоряет процесс исследования. В ГВК удастся сочетать высокую скорость функционирования аналоговых средств и высокую точность расчетов на базе цифровых средств вычислительной техники. Одновременно удастся за счет наличия цифровых устройств обеспечить контроль проведения операций. Опыт использования вычислительной техники в задачах моделирования показывает, что

с усложнением объекта большую эффективность по скорости решения и по стоимости выполнения операций дает использование гибридной техники.

Конкретным техническим средством воплощения имитационной модели могут быть ЭВМ, АВМ и ГВК. Если использование аналоговой техники ускоряет получение конечных результатов, сохраняя некоторую наглядность протекания реального процесса, то применение средств цифровой техники позволяет осуществить контроль за реализацией модели, создать программы по обработке и хранению результатов моделирования, обеспечить эффективный диалог исследователя с моделью.

Модель строится по **иерархическому принципу**: последовательно анализируются отдельные стороны функционирования объекта и при перемещении центра внимания исследователя рассмотренные ранее подсистемы переходят во внешнюю среду. Иерархическая структура моделей может раскрывать и ту последовательность, в которой изучается реальный объект, а именно последовательность перехода от структурного (топологического) уровня к функциональному (алгоритмическому) и от функционального к параметрическому. Результат моделирования в значительной степени зависит от адекватности исходной концептуальной (описательной) модели, от полученной степени подобия описания реального объекта, то числа реализаций модели и многих других факторов. В ряде случаев сложность объекта не позволяет не только построить математическую модель объекта, но и дать достаточно близкое кибернетическое описание, и перспективным здесь является выделение наиболее трудно поддающейся математическому описанию части объекта и включение этой реальной части физического объекта в имитационную модель. Тогда модель реализуется, с одной стороны, на базе средств вычислительной техники, а с другой — имеется реальная часть объекта. Это значительно расширяет возможности и повышает достоверность результатов моделирования.

Имитационная система реализуется на ЭВМ и позволяет исследовать имитационную модель, задаваемую в виде определенной совокупности отдельных блочных моделей и связей между

ними в их взаимодействии в пространстве и времени при реализации какого-либо процесса. Можно выделить три основные группы блоков: блоки, характеризующие моделируемый процесс функционирования системы; блоки, отображающие внешнюю среду и ее воздействие на реализуемый процесс; блоки, играющие служебную вспомогательную роль, обеспечивая взаимодействие первых двух, а также выполняющие дополнительные функции по получению и обработке результатов моделирования. Кроме того, имитационная система характеризуется набором переменных, с помощью которых удастся управлять изучаемым процессом, и набором начальных условий, когда можно изменять условия проведения машинного эксперимента.

Таким образом, имитационная система есть средство проведения машинного эксперимента, причем эксперимент может ставиться многократно, заранее планироваться, могут определяться условия его проведения. Необходимо при этом выбрать методику оценки адекватности получаемых результатов и автоматизировать как процессы получения, так и процессы обработки результатов в ходе машинного эксперимента.

Возможности машинного моделирования

Несмотря на то, что имитационное моделирование на ЭВМ является мощным инструментом исследования систем, его применение рационально не во всех случаях. Известно множество задач, решаемых более эффективно другими методами. Вместе с тем для большого класса задач исследования и проектирования систем метод имитационного моделирования наиболее приемлем. Правильное его употребление возможно лишь в случае четкого понимания сущности метода имитационного моделирования и условий его использования в практике исследования реальных систем при учете особенностей конкретных систем и возможностей их исследования различными методами.

В качестве основных критериев целесообразности применения метода имитационного моделирования на ЭВМ можно указать следующие: отсутствие или неприемлемость аналитических, численных и качественных методов решения поставленной задачи;

наличие достаточного количества исходной информации о моделируемой системе S для обеспечения возможности построения адекватной имитационной модели; необходимость проведения на базе других возможных методов решения очень большого количества вычислений, трудно реализуемых даже с использованием ЭВМ; возможность поиска оптимального варианта системы при ее моделировании на ЭВМ.

Имитационное моделирование на ЭВМ, как и любой метод исследований, имеет достоинства и недостатки, проявляющиеся в конкретных приложениях. К числу основных достоинств метода имитационного моделирования (при исследовании сложных систем) можно отнести следующие: машинный эксперимент с имитационной моделью дает возможность исследовать особенности процесса функционирования системы S в любых условиях; применение ЭВМ в имитационном эксперименте существенно сокращает продолжительность испытаний по сравнению с натурным экспериментом; имитационная модель позволяет включать результаты натурных испытаний реальной системы или ее частей для проведения дальнейших исследований; имитационная модель обладает известной гибкостью варьирования структуры, алгоритмов и параметров моделируемой системы, что важно с точки зрения поиска оптимального варианта системы; имитационное моделирование сложных систем часто является единственным практически реализуемым методом исследования процесса функционирования таких систем на этапе их проектирования.

Основным недостатком, проявляющимся при машинной реализации метода имитационного моделирования, является то, что решение, полученное при анализе имитационной модели, всегда носит частный характер, так как оно соответствует фиксированным элементам структуры, алгоритмам поведения и значениям параметров системы, начальных условий и воздействий внешней среды. Поэтому для полного анализа характеристик процесса функционирования систем, а не получения только отдельной точки, приходится многократно воспроизводить имитационный эксперимент, варьируя исходные данные задачи. При этом, как следствие, возникает увеличение затрат машинного времени на проведение

эксперимента с имитационной моделью процесса функционирования исследуемой системы.

Эффективность машинного моделирования

При имитационном моделировании, так же как и при любом другом методе анализа и синтеза системы, весьма существен вопрос его эффективности. Эффективность имитационного 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 реальным исследованием, то есть с моделированием на реальном объекте при проведении натурного эксперимента. Поскольку это не всегда удается сделать, статистический подход позволяет с определенной степенью точности при повторяемости машинного эксперимента получить какие-то усредненные характеристики поведения системы. Существенное влияние на точность моделирования оказывает число реализаций, и в зависимости от требуемой достоверности можно оценить необходимое число реализаций воспроизводимого случайного процесса.

Существенным показателем эффективности являются затраты машинного времени. В связи с использованием ЭВМ различного типа суммарные затраты складываются из времени по вводу и выводу данных по каждому алгоритму моделирования, времени на проведение вычислительных операций, с учетом обращения к оперативной памяти и внешним устройствам, а также сложности каждого моделирующего алгоритма. Расчеты затрат машинного времени являются приближенными и могут уточняться по мере отладки программ и накопления опыта у исследователя при работе с имитационной моделью. Большое влияние на затраты машинного времени при проведении имитационных экспериментов оказывает рациональное планирование таких экспериментов. Определенное влияние на затраты машинного времени могут оказать процедуры обработки результатов моделирования, а также форма их представления. Построение имитационных моделей больших

систем и проведение машинных экспериментов с этими моделями представляют собой достаточно трудоемкий процесс, в котором в настоящее время много неизученного. Однако специалисты в области проектирования, исследования и эксплуатации больших систем должны в совершенстве знать методологию машинного моделирования, сложившуюся к настоящему времени, чтобы быть готовыми к появлению ЭВМ следующих поколений, которые позволят сделать еще один существенный шаг в автоматизации построения моделей и использования имитационного моделирования систем.

Технологическая последовательность построения и исследования сложных систем

1. Системы (проблемная область).
2. Объект моделирования.
3. Целевое назначение моделей.
4. Требования к моделям.
5. Формы представления моделей.
6. Вид описания моделей.
7. Характер реализации моделей.
8. Метод исследования.

Контрольные вопросы

1. Что такое модель системы?
2. Как определяется понятие «моделирование»?
3. Какие современные средства вычислительной техники используются для моделирования систем?
4. Что называется точностью и достоверностью результатов моделирования систем на ЭВМ?
5. Как повысить точность результатов статистического моделирования системы в условиях ограниченности ресурсов инструментальной ЭВМ?
6. Что называется информационной моделью системы?
7. Каковы характерные черты эволюционных моделей систем?
8. Что называется трактобельностью модели системы?

9. В чем суть адаптации применительно к системам управления различными объектами?

10. Какие существуют классификационные признаки видов моделирования систем?

11. Какие есть виды моделирования?

12. Как классифицируются системы?

13. Что представляет собой система?

14. Какие отличительные особенности физического и имитационного моделирования?

15. Что такое агентное моделирование?

2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ И АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ 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 до проведения машинного эксперимента с моделью системы, которые для целей эффективного решения пользователем практических задач моделирования рационально оформить в виде методики разработки и машинной реализации моделей. При этом наиболее существенным фактором, который следует учитывать уже при формализации и алгоритмизации моделей, является использование в качестве инструмента исследования аппаратно-программных средств вычислительной техники. В основе выделения этапов моделирования сложной системы лежит также необходимость привлечения для выполнения этой трудоемкой работы коллективов разработчиков различных специальностей (системщиков, алгоритмистов, программистов).

2.1. Последовательность разработки и компьютерной реализации моделей систем

Развитие вычислительной техники дало большой скачок в моделировании, наиболее эффективным методом исследования больших систем стало машинное, без которого невозможно решение большинства крупных народнохозяйственных проблем. Одной из актуальных задач 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, о границах

применимости и правильно организовать моделирование систем на современных средствах вычислительной техники.

Методологические аспекты моделирования

При построении математических, алгоритмических моделей и рассмотрении программных и прикладных аспектов машинного моделирования, необходимы знания методологических основ создания широкого класса математических моделей объектов, реализуемых на средствах вычислительной техники. Моделирование с использованием средств вычислительной техники позволяет исследовать механизм явлений, протекающих в реальном объекте с большими или малыми скоростями, когда в натурных экспериментах с объектом трудно (или невозможно) проследить за изменениями, происходящими в течение короткого времени, или когда получение достоверных результатов сопряжено с длительным экспериментом. При необходимости машинная модель дает возможность как бы «растягивать» или «сжимать» реальное время, так как машинное моделирование связано с понятием системного времени, отличного от реального. Кроме того, с помощью машинного моделирования в диалоговой системе можно обучать персонал АСОИУ принятию решений в управлении объектом, например при организации деловой игры, что позволяет выработать необходимые практические навыки реализации процесса управления.

Сущность машинного моделирования системы состоит в проведении на вычислительной машине эксперимента с моделью, которая представляет собой некоторый программный комплекс, описывающий формально и (или) алгоритмически поведение элементов системы в процессе ее функционирования, то есть в их взаимодействии друг с другом и внешней средой. Машинное моделирование с успехом применяют в тех случаях, когда трудно четко сформулировать критерий оценки качества функционирования системы и цель ее не поддается полной формализации, поскольку позволяет сочетать программно-технические возможности ЭВМ со способностями человека мыслить неформальными категориями. В дальнейшем основное внимание будет уделено моделированию систем на универсальных ЭВМ как наиболее эффектив-

ному инструменту исследования и разработки АСОИУ различных уровней.

Требования пользователя к модели

Сформулируем основные требования, предъявляемые к модели процесса функционирования системы.

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

При машинном моделировании системы характеристики процесса ее функционирования определяются на основе модели, построенной исходя из имеющейся исходной информации об объекте моделирования. При получении новой информации об объекте его модель пересматривается и уточняется с учетом новой информации, то есть процесс моделирования, включая разработку и машинную реализацию модели, является итерационным. Этот итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет получена модель, которую можно считать адекватной в рамках

решения поставленной задачи исследования и проектирования системы.

Моделирование систем с помощью ЭВМ можно использовать в следующих случаях: для исследования системы **S** до того, как она спроектирована, с целью определения чувствительности характеристики к изменениям структуры, алгоритмов и параметров объекта моделирования и внешней среды; на этапе проектирования системы для анализа и синтеза различных вариантов системы и выбора среди конкурирующих такого варианта, который удовлетворял бы заданному критерию оценки эффективности системы при принятых ограничениях; после завершения проектирования и внедрения системы, то есть при ее эксплуатации, для получения информации, дополняющей результаты натурных испытаний (эксплуатации) реальной системы, и для получения прогнозов эволюции (развития) системы во времени.

Существуют общие положения, применяемые ко всем перечисленным случаям машинного моделирования. Даже в тех случаях, когда конкретные способы моделирования отличаются друг от друга и имеются различные модификации моделей, например в области машинной реализации моделирующих алгоритмов с использованием конкретных программно-технических средств, в практике моделирования систем можно сформулировать общие принципы, которые могут быть положены в основу методологии машинного моделирования.

Этапы моделирования систем

Этапы моделирования системы, к числу которых относятся: построение концептуальной модели системы и ее формализация; алгоритмизация модели системы и ее машинная реализация; получение и интерпретация результатов моделирования системы.

Взаимосвязь перечисленных этапов моделирования систем и их составляющих (подэтапов) может быть представлена в виде сетевого графика, показанного на рис. 2.1.1.

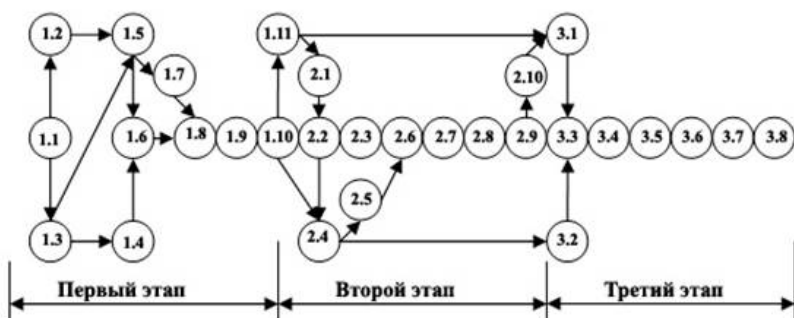


Рис. 2.1.1. Сетевой график

Подэтапы:

- 1.1 — постановка задачи машинного моделирования системы;
- 1.2 — анализ задачи моделирования системы;
- 1.3 — определение требований к исходной информации об объекте моделирования и организация ее сбора;
- 1.4 — выдвижение гипотез и принятие предположений;
- 1.5 — определение параметров и переменных модели;
- 1.6 — установление основного содержания модели;
- 1.7 — обоснование критериев оценки эффективности системы;
- 1.8 — определение процедур аппроксимации;
- 1.9 — описание концептуальной модели системы;
- 1.10 — проверка достоверности концептуальной модели;
- 1.11 — составление технической документации по первому этапу;
- 2.1 — построение логической схемы модели;
- 2.2 — получение математических соотношений;
- 2.3 — проверка достоверности модели системы;
- 2.4 — выбор инструментальных средств для моделирования;
- 2.5 — составление плана выполнения работ по программированию;

- 2.6 — спецификация и построение схемы программы;
- 2.7 — верификация и проверка достоверности схемы программы;
- 2.8 — проведение программирования модели;
- 2.9 — проверка достоверности программы;
- 2.10 — составление технической документации по второму этапу;
- 3.1 — планирование машинного эксперимента с моделью системы;
- 3.2 — определение требований к вычислительным средствам;
- 3.3 — проведение рабочих расчетов;
- 3.4 — анализ результатов моделирования системы;
- 3.5 — представление результатов моделирования;
- 3.6 — интерпретация результатов моделирования;
- 3.7 — подведение итогов моделирования и выдача рекомендаций;
- 3.8 — составление технической документации по третьему этапу.

Таким образом, процесс моделирования системы сводится к выполнению перечисленных подэтапов, сгруппированных в виде трех этапов. На этапе построения концептуальной модели и ее формализации проводится исследование моделируемого объекта с точки зрения выделения основных составляющих процесса его функционирования, определяются необходимые аппроксимации и получается обобщенная схема модели системы, которая преобразуется в машинную модель на втором этапе моделирования путем последовательной алгоритмизации и программирования модели.

Последний третий этап моделирования системы сводится к проведению, согласно полученному плану рабочих расчетов на ЭВМ с использованием выбранных программно-технических средств, получению и интерпретации результатов моделирования системы S с учетом воздействия внешней среды. Очевидно, что при построении модели и ее машинной реализации при получении

новой информации возможен пересмотр ранее принятых решений, то есть процесс моделирования является итерационным.

2.2. Построение концептуальной модели системы

Первый этап машинного моделирования — построения **концептуальной модели** системы и ее формализации — формулируется модель и строится ее формальная схема, то есть основным назначением этого этапа является переход от содержательного описания объекта к его математической модели, другими словами, процесс формализации.

Моделирование систем на ЭВМ в настоящее время — наиболее универсальный и эффективный метод оценки характеристик больших систем. Наиболее ответственными и наименее формализованными моментами в этой работе являются: 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, то есть исследование процесса функционирования системы на неадекватной модели вообще теряет смысл. Под адекватной моделью будем понимать модель, которая с определенной степенью приближения на уровне понимания моделируемой системы разработчиком модели отражает процесс ее функционирования во внешней среде.

Подэтапы первого этапа моделирования

Рассмотрим более подробно основные подэтапы построения концептуальной модели системы и ее формализации (рис. 2.1.1).

1. Постановка задачи машинного моделирования системы

Ставится четкая формулировка задачи исследования конкретной системы и далее:

- признание существования задачи и необходимости машинного моделирования;
- выбор методики решения задачи с учетом имеющихся ресурсов;
- определение масштаба задачи и возможности разбиения ее на подзадачи.

Необходимо ценить эффективность возможных математических методов и программно-технических средств их решения.

Отработка задач, подзадач позволяет сформулировать задачу исследования и приступить к ее реализации. Вполне возможен при тщательной проработке всех вопросов пересмотр начальной постановки задачи в процессе моделирования.

2. Анализ задачи моделирования системы

Проведение анализа задачи способствует преодолению возникающих в дальнейшем трудностей при ее решении методом моделирования. На рассматриваемом втором этапе основная работа сводится именно к проведению анализа, включая:

- выбор критериев оценки эффективности процесса функционирования системы S ;
- определение эндогенных и экзогенных переменных модели M ;
- выбор возможных методов идентификации;
- выполнение предварительного анализа содержания второго этапа алгоритмизации модели системы и ее машинной реализации;
- выполнение предварительного анализа содержания третьего этапа получения и интерпретации результатов моделирования системы.

3. Определение требований к исходной информации об объекте моделирования и организация ее сбора

После постановки задачи моделирования системы определяются требования к информации, из которой получают качественные и количественные исходные данные, необходимые для решения этой задачи. Эти данные помогают глубоко разобраться в сущности задачи, методах ее решения. Таким образом, на этом подэтапе проводится:

- выбор необходимой информации о системе S и внешней среде E ;
- подготовка априорных данных;
- анализ имеющихся экспериментальных данных;
- выбор методов и средств предварительной обработки информации о системе.

От качества исходной информации об объекте моделирования существенно зависит как адекватность модели, так и достоверность результатов моделирования.

4. Выдвижение гипотез и принятие предположений

Гипотезы при построении модели системы служат для заполнения «пробелов» в понимании задачи исследователем. Выдвигаются также гипотезы относительно возможных результатов моделирования системы, справедливость которых проверяется при проведении машинного эксперимента. Предположения предусматривают, что некоторые данные неизвестны или их нельзя получить. Предположения могут выдвигаться относительно известных данных, которые не отвечают требованиям решения поставленной задачи. Предположения дают возможность провести упрощения модели в соответствии с выбранным уровнем моделирования. При выдвижении гипотез и принятии предположений учитываются следующие факторы:

- объем имеющейся информации для решения задач;
- подзадачи, для которых информация недостаточна;
- ограничения на ресурсы времени для решения задачи;
- ожидаемые результаты моделирования.

В процессе работы с моделью системы возможно многократное возвращение к этому подэтапу, в зависимости от полученных результатов моделирования и новой информации об объекте.

5. Определение параметров и переменных модели

Прежде чем перейти к описанию математической модели, необходимо определить параметры системы, входные и выходные переменные воздействия внешней среды. Конечной целью этого подэтапа является подготовка к построению математической модели системы S , функционирующей во внешней среде E , для чего необходимо рассмотрение всех параметров и переменных модели и оценка степени их влияния на процесс функционирования системы в целом.

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.

6. Установление основного содержания модели

На этом подэтапе определяется основное содержание модели и выбирается метод построения модели системы из тех, которые разрабатываются на основе принятых гипотез и предположений. При этом учитываются следующие особенности:

- формулировка задачи моделирования системы;
- структура системы S и алгоритмы ее поведения, воздействия внешней среды E ;
- возможные методы и средства решения задачи моделирования.

7. Обоснование критериев оценки эффективности системы

Для оценки качества процесса функционирования моделируемой системы необходимо выбрать некоторую совокупность критериев оценки эффективности, то есть в математической постановке задача сводится к получению соотношения для оценки эффективности как функции параметров и переменных системы. Эта функция представляет собой поверхность отклика в исследуемой области изменения параметров и переменных и позволяет определить реакцию системы. Эффективность системы S можно оценить с помощью интегральных или частных критериев, выбор которых зависит от рассматриваемой задачи.

8. Определение процедур аппроксимации

Для аппроксимации реальных процессов, протекающих в системе S , обычно используют три вида процедур:

- детерминированную;
- вероятностную;
- определения средних значений.

При детерминированной процедуре результаты моделирования однозначно определяются по данной совокупности входных воздействий, параметров и переменных системы. В этом случае отсутствуют случайные элементы, влияющие на результаты моделирования.

Вероятностная (рандомизированная) процедура применяется в том случае, когда случайные элементы, включая воздействия

внешней среды, влияют на характеристики процесса функционирования системы и когда необходимо получить информацию о законах распределения выходных переменных. Процедура определения средних значений используется тогда, когда при моделировании системы интерес представляют средние значения выходных переменных при наличии случайных элементов.

9. Описание концептуальной модели системы

На этом подэтапе построения модели системы:

- описывается концептуальная модель M_k в абстрактных терминах и понятиях;
- дается описание модели с использованием типовых математических схем;
- принимаются окончательно гипотезы и предположения;
- обосновывается выбор процедуры аппроксимации реальных процессов при построении модели.

На этом подэтапе проводится подробный анализ задачи, рассматриваются возможные методы ее решения и дается детальное описание концептуальной модели, которая затем используется на втором этапе моделирования.

10. Проверка достоверности концептуальной модели

После того как концептуальная модель описана, необходимо проверить достоверность некоторых концепций модели перед тем, как перейти к следующему этапу моделирования системы. Проверять достоверность концептуальной модели достаточно сложно, так как процесс ее построения является эвристическим и такая модель описывается в абстрактных терминах и понятиях. Один из методов проверки модели — применение операций обратного перехода, позволяющий проанализировать модель, вернуться к принятым аппроксимациям и, наконец, рассмотреть снова реальные процессы, протекающие в моделируемой системе. Проверка достоверности концептуальной модели должна включать:

- проверку замысла модели;
- оценку достоверности исходной информации;
- рассмотрение постановки задачи моделирования;
- анализ принятых аппроксимаций;
- исследование гипотез и предположений.

После разработки концептуальной модели следует переходить к этапу машинной реализации модели, так как ошибки в модели не позволяют получить достоверные результаты моделирования.

11. Составление технической документации по первому этапу

После завершения этапа построения концептуальной модели и ее формализации составляется технический отчет по этапу, который 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.

Составление технической документации — обязательное условие успешного проведения моделирования системы, так как в процессе разработки модели большой системы и ее машинной реализации принимают участие на различных этапах коллективы специалистов разных профилей (начиная от постановщиков задач и кончая программистами) и документация является средством обеспечения их эффективного взаимодействия при решении поставленной задачи методом моделирования.

2.3. Проверка адекватности модели и объекта моделирования

Решения, принимаемые исследователем по результатам имитационного моделирования, могут быть конструктивными только при выполнении двух основных условий:

- полученные результаты обладают требуемой точностью и достоверностью;
- исследователь способен правильно интерпретировать полученные результаты и знает, каким образом они могут быть использованы.

Возможность выполнения первого условия закладывается, в основном, еще на этапе разработки модели и частично — на этапе планирования эксперимента. Достоверность результатов моделирования предполагает, что модель, с помощью которой они получены, не только является «правильной», но отвечает и некоторым дополнительным требованиям, предъявляемым к имитационным моделям. Эти требования и методы оценки соответствия им (созданной модели) рассматриваются ниже. Способность исследователя правильно интерпретировать полученные результаты и принимать на их основе важные решения существенно зависят от степени соответствия формы представления результатов целям моделирования.

Если разработчик модели уверен, что полученные результаты будут использоваться в соответствии с одной, четко определенной, целью, форма их представления может быть определена заранее. В этом случае преобразование экспериментальных данных к требуемому виду может производиться либо в ходе эксперимента, либо сразу после его завершения. Такой подход позволяет экономить память компьютера, необходимую для хранения большого количества необработанных данных, а также сократить время на анализ результатов и принятие решения.

Если же заранее конкретизировать цель моделирования сложно или целей несколько, данные должны накапливаться в базе данных и затем уже выдаваться в требуемой форме по запросу пользователя. Как правило, по такому принципу строятся системы автоматизации моделирования.

Далее будет показано, как при правильной организации обработки экспериментальных данных могут быть получены дополнительные сведения о моделируемой системе.

Оценка качества имитационной модели

Оценка качества модели является завершающим этапом ее разработки и преследует две цели:

- проверить соответствие модели ее назначению (целям исследования);
- оценить достоверность и статистические характеристики результатов, получаемых при проведении модельных экспериментов.

При аналитическом моделировании достоверность результатов определяется двумя основными факторами:

- корректным выбором математического аппарата, используемого для описания исследуемой системы;
- методической ошибкой, присущей данному математическому методу.

При имитационном моделировании на достоверность результатов влияет целый ряд дополнительных факторов, основными из которых являются:

- моделирование случайных факторов, основанное на использовании датчиков случайных чисел, которые могут вносить «искажения» в поведение модели;
- наличие нестационарного режима работы модели;
- использование нескольких разнотипных математических методов в рамках одной модели;
- зависимость результатов моделирования от плана эксперимента;
- необходимость синхронизации работы отдельных компонент модели;
- наличие модели рабочей нагрузки, качество которой зависит, в свою очередь, от тех же факторов.

Пригодность имитационной модели для решения задач исследования характеризуется тем, в какой степени она обладает так называемыми целевыми свойствами. Основными из них являются:

- адекватность;
- устойчивость;
- чувствительность.

Оценка адекватности

Под адекватностью понимают степень соответствия модели тому реальному явлению или объекту, для описания которого она строится. Создаваемая модель ориентирована, как правило, на исследование определенного подмножества свойств этого объекта. Поэтому можно считать, что адекватность модели определяется степенью ее соответствия не столько реальному объекту, сколько целям исследования. В наибольшей степени это утверждение справедливо относительно моделей проектируемых систем (то

есть в ситуациях, когда реальная система вообще не существует). Тем не менее, во многих случаях полезно иметь формальное подтверждение (или обоснование) адекватности разработанной модели. Один из наиболее распространенных способов такого обоснования — использование методов математической статистики. Суть этих методов заключается в проверке выдвинутой гипотезы (в данном случае — об адекватности модели) на основе некоторых статистических критериев.

При проверке гипотез методами математической статистики необходимо иметь в виду, что статистические критерии не могут доказать ни одной гипотезы — они могут лишь указать на отсутствие опровержения. Процедура оценки основана на сравнении измерений на реальной системе и результатов экспериментов на модели и может проводиться различными способами. Наиболее распространенные из них:

- по средним значениям откликов модели и системы;
- по дисперсиям отклонений откликов модели от среднего значения откликов системы;
- по максимальному значению относительных отклонений откликов модели от откликов системы.

Перечисленные способы оценки достаточно близки между собой по сути, поэтому ограничимся рассмотрением первого из них. При этом способе проверяется гипотеза о близости среднего значения наблюдаемой переменной Y среднему значению отклика реальной системы Y^* . В результате N_0 опытов на реальной системе получают множество значений (выборку) Y^* . Выполнив NM экспериментов на модели, также получают множество значений наблюдаемой переменной Y .

Затем вычисляются оценки математического ожидания и дисперсии откликов модели и системы, после чего выдвигается гипотеза о близости средних значений величин Y^* и Y (в статистическом смысле). Основой для проверки гипотезы является t -статистика (распределение Стьюдента). Ее значение, вычисленное по результатам испытаний, сравнивается с критическим значением $t_{кр}$ взятым из справочной таблицы. Если выполняется неравенство $t_n < t_{кр}$, то гипотеза принимается. Необходимо еще раз подчеркнуть, что статистические методы применимы только в том

случае, если оценивается адекватность модели существующей системе. На проектируемой системе провести измерения, естественно, не представляется возможным.

Единственный способ преодолеть это препятствие заключается в том, чтобы принять в качестве эталонного объекта концептуальную модель проектируемой системы. Тогда оценка адекватности программно реализованной модели заключается в проверке того, насколько корректно она отражает концептуальную модель. Данная проблема сходна с проверкой корректности любой компьютерной программы, и ее можно решать соответствующими методами, например с помощью тестирования.

Оценка устойчивости

При оценке адекватности модели как существующей, так и проектируемой системы реально может быть использовано лишь ограниченное подмножество всех возможных значений входных параметров (рабочей нагрузки и внешней среды). В связи с этим для обоснования достоверности получаемых результатов моделирования большое значение имеет проверка устойчивости модели. В теории моделирования это понятие трактуется следующим образом.

Устойчивость модели — это ее способность сохранять адекватность при исследовании эффективности системы на всем возможном диапазоне рабочей нагрузки, а также при внесении изменений в конфигурацию системы.

Каким образом может быть оценена устойчивость модели? Универсальной процедуры проверки устойчивости модели не существует. Разработчик вынужден прибегать к методам «для данного случая», частичным тестам и здравому смыслу. Часто полезна апостериорная проверка. Она состоит в сравнении результатов моделирования и результатов измерений на системе после внесения в нее изменений. Если результаты моделирования приемлемы, уверенность в устойчивости модели возрастает.

В общем случае можно утверждать, что чем ближе структура модели структуре системы и чем выше степень детализации, тем устойчивее модель. Устойчивость результатов моделирования может быть также оценена методами Математической статистики. Здесь уместно вспомнить основную задачу математической статистики. Она заключается в том, чтобы проверить гипотезу относи-

тельно свойств некоторого множества элементов, называемого генеральной совокупностью, оценивая свойства какого-либо подмножества генеральной совокупности (то есть выборки). В генеральной совокупности исследователя обычно интересует некоторый признак, который обусловлен случайностью и может иметь качественный или количественный характер.

В данном случае именно устойчивость результатов моделирования можно рассматривать как признак, подлежащий оценке. Для проверки гипотезы об устойчивости результатов может быть использован критерий Уилкоксона, который служит для проверки того, относятся ли две выборки к одной и той же генеральной совокупности (то есть, обладают ли они одним и тем же статистическим признаком). Например, в двух партиях некоторой продукции измеряется определенный признак, и требуется проверить гипотезу о том, что этот признак имеет в обеих партиях одинаковое распределение; другими словами, необходимо убедиться, что технологический процесс от партии к партии изменяется незначительно.

При статистической оценке устойчивости модели соответствующая гипотеза может быть сформулирована следующим образом: при изменении входной (рабочей) нагрузки или структуры ИМ закон распределения результатов моделирования остается неизменным. Проверку указанной гипотезы H проводят при следующих исходных данных. Пусть имеются две выборки $X=(x_1, \dots, x_n)$ и $Y=(y_1, \dots, y_n)$, полученные для различных значений рабочей нагрузки; относительно законов распределения X и Y никаких предположений не делается. Значения обеих выборок упорядочиваются вместе по возрастанию. Затем анализируется взаимное расположение x_i и y_j . В случае $y_j < x_i$ говорят, что пара значений (x_i, y_j) образует инверсию.

Например, пусть для $n = m = 3$ после упорядочивания получилась такая последовательность значений: $y_1, x_1, y_3, x_2, y_2, x_3$; тогда имеем инверсии: $(x_1, y_1), (x_2, y_1), (x_2, y_3), (x_3, y_1), (x_3, y_2), (x_3, y_3)$.

Подсчитывают полное число инверсий U . Если гипотеза верна, то U не должно сильно отклоняться от своего математического ожидания M . От гипотезы отказываются, если $|U - M| > U_{кр}$ ($U_{кр}$ определяют по таблице для заданного уровня значимости).

Оценка чувствительности

Очевидно, что устойчивость является положительным свойством модели. Однако если изменение входных воздействий или параметров модели (в некотором заданном диапазоне) не отражается на значениях выходных параметров, то польза от такой модели невелика (ее можно назвать «бесчувственной»). В связи с этим возникает задача оценивания чувствительности модели к изменению параметров рабочей нагрузки и внутренних параметров самой системы. Такую оценку проводят по каждому параметру X в отдельности. Основана она на том, что обычно диапазон возможных изменений параметра известен. Одна из наиболее простых и распространенных процедур оценивания состоит в следующем.

Вычисляется величина относительного среднего приращения параметра X :

$$\Delta X = \frac{(X_{\max} - X_{\min}) \cdot 2}{X_{\max} + X_{\min}} \cdot 100\% \quad (2.3.1)$$

Проводится пара модельных экспериментов при значениях $X=X_{\max}$ и $X=X_{\min}$ и средних фиксированных значениях остальных параметров. Определяются значения отклика модели и вычисляется относительное приращение наблюдаемой переменной Y :

$$\Delta Y = \frac{|Y_1 - Y_2| \cdot 2}{Y_1 + Y_2} \cdot 100\% \quad (2.3.2)$$

В результате для k -го параметра модели имеют пару значений (X_k, Y_k) , характеризующую чувствительность модели по этому параметру. Аналогично формируются пары для остальных параметров модели, которые образуют множество $\{X_k, Y_k\}$. Данные, полученные при оценке чувствительности модели, могут быть использованы, в частности, при планировании экспериментов: большее внимание должно уделяться тем параметрам, по которым модель является более чувствительной.

Калибровка модели

Если в результате проведенной оценки качества модели оказалось, что ее целевые свойства не удовлетворяют разработчика, не-

обходимо выполнить ее калибровку, то есть коррекцию с целью приведения в соответствие к предъявляемым требованиям. Как правило, процесс калибровки носит итеративный характер и состоит из трех основных этапов:

- глобальные изменения модели (например, введение новых процессов, изменение типов событий и т. д.);
- локальные изменения (в частности, изменение некоторых законов распределения моделируемых случайных величин);
- изменение специальных параметров, называемых калибровочными.

Структурные изменения модели, как более сложные, должны рассматриваться только после того, как все попытки калибровки модели путем изменения параметров и локальных модификаций окажутся безуспешными. Однако такая стратегия может скрыть структурное несоответствие или недостаточную степень детальности модели. В этом смысле начинать калибровку с внесения глобальных изменений значительно безопаснее.

Вообще целесообразно объединить оценку целевых свойств ИМ и ее калибровку в единый процесс. Именно такая стратегия принята в статистическом методе калибровки, описанном ниже. Процедура калибровки состоит из трех шагов, каждый из которых является итеративным (рис. 2.3.1).

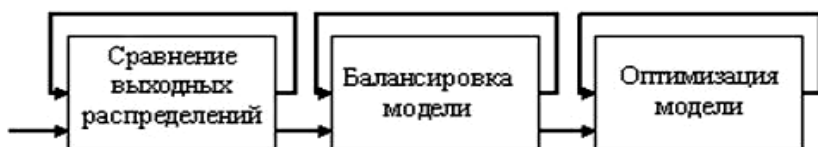


Рис. 2.3.1. Схема процесса калибровки модели

- **Сравнение выходных распределений.** Цель — оценка адекватности имитационной модели. Критерии сравнения могут быть различны. В частности, может использоваться величина разности между средними значениями откликов модели и

системы. Устранение различий на этом шаге основано на внесении глобальных изменений.

- **Балансировка модели.** Основная задача — оценка устойчивости и чувствительности модели. По результатам, как правило, производятся локальные изменения (но возможны и глобальные).

- **Оптимизация модели.** Цель этого этапа — обеспечение требуемой точности результатов. Здесь возможны три основных направления работ:

- 1) дополнительная проверка качества датчиков случайных чисел;
- 2) снижение влияния переходного режима;
- 3) применение специальных методов понижения дисперсии.

2.4. Формы представления логической и функциональной структуры моделей

Удобной формой представления логической структуры моделей процессов функционирования систем и машинных программ является схема. На различных этапах моделирования составляются обобщенные и детальные логические схемы моделирующих алгоритмов, а также схемы программ.

Обобщенная (укрупненная) схема моделирующего алгоритма задает общий порядок действий при моделировании системы без каких-либо уточняющих деталей. Обобщенная схема показывает, что необходимо выполнить на очередном шаге моделирования, например обратиться к датчику случайных чисел.

Детальная схема моделирующего алгоритма содержит уточнения, отсутствующие в обобщенной схеме. Детальная схема показывает не только, что следует выполнить на очередном шаге моделирования системы, но и как это выполнить.

Логическая схема моделирующего алгоритма представляет собой логическую структуру модели процесса функционирования системы S . Логическая схема указывает упорядоченную во времени последовательность логических операций, связанных с решением задачи моделирования.

Схема программы отображает порядок программной реализации моделирующего алгоритма с использованием конкретного математического обеспечения. Схема программы представляет собой интерпретацию логической схемы моделирующего алгоритма разработчиком программы на базе конкретного алгоритмического языка. Различие между этими схемами заключается в том, что логическая схема отражает логическую структуру модели процесса функционирования системы, а схема программы — логику машинной реализации модели с использованием конкретных программно-технических средств моделирования.

Логическая схема алгоритма и схема программы могут быть выполнены как в укрупненной, так и в детальной форме. Для начертания этих схем используется набор символов, определяемых ГОСТ 19.701–90 (ИСО 5807–85) «Единая система программной документации».

2.5. Пример построения схем моделирующих алгоритмов

Условные обозначения и правила выполнения. Некоторые наиболее употребительные в практике моделирования на ЭВМ символы показаны на рис. 2.5.1, где изображены основные, специфические и специальные символы процесса. К ним относятся: основной символ: *a* — процесс — символ отображает функцию обработки данных любого вида (выполнение определенной операции или группы операций, приводящее к изменению значения, формы или размещения информации или к определению, по которому из нескольких направлений потока следует двигаться); специфические символы процесса: *b* — решение — символ отображает решение или функцию переключательного типа, имеющую один вход и ряд альтернативных выходов, один и только один из которых может быть активизирован после вычисления условий, определенных внутри этого символа (соответствующие результаты вычисления могут быть записаны по соседству с линиями, отображающими эти пути); *v* — подготовка — символ отображает модификацию команды или группы команд с целью воздействия на некоторую последующую функцию (установка переключателя,

модификация индексного регистра или инициализация программы); z — predetermined процесс — символ отображает predetermined процесс, состоящий из одной или нескольких операций или шагов программы, которые определены в другом месте (в подпрограмме, модуле); d — ручная операция — символ отображает любой процесс, выполняемый человеком; специальные символы: e — соединитель — символ отображает выход в часть схемы и вход из другой части этой схемы и используется для обрыва линии и продолжения ее в другом месте (соответствующие символы-соединители должны содержать одно и то же уникальное обозначение); $ж$ — терминатор — символ отображает выход во внешнюю среду и вход из внешней среды (начало или конец схемы алгоритма, внешнее использование или пункт назначения данных).

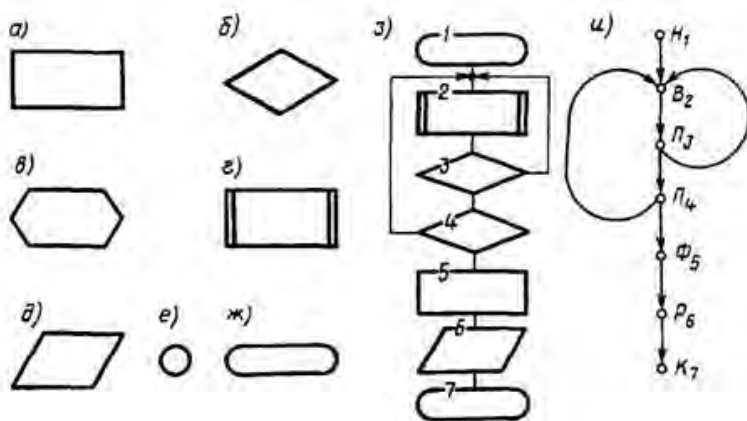


Рис. 2.5.1. Символы и схемы моделирующих алгоритмов

Пример изображения схемы моделирующего алгоритма показан на рис. 2.5.1.

Обычно схема является наиболее удобной формой представления структуры моделирующих алгоритмов. В ряде случаев используются и другие формы представления моделирующих алгоритмов

(рис. 2.5.1 и), где H_1 — начало, K_7 — конец, B_2 — вычисление, Φ_5 — формирование, Π_4 — проверка условия, P_6 — выдача результата, $I = 1, g$, где g — общее число операторов моделирующего алгоритма. В качестве пояснения к граф-схеме алгоритма в тексте дается раскрытие содержания операторов, что позволяет упростить представление алгоритма, но усложняет работу с ним. Моделирующие алгоритмы могут быть также представлены в виде операторных схем. Обозначения операторов на такой схеме соответствуют обозначениям для граф-схем.

2.6. Структурно-параметрическое моделирование систем

Построение структурно-параметрической модели исследуемого объекта связано с представлением его в виде системы взаимодействующих элементов и как подсистемы и процессов. Для построения структурно-параметрических моделей используется один из методов исследования сложных объектов и процессов — системный анализ. Задачей системного анализа является параметрическое описание процесса с выделением факторов, влияющих на исход получения или приобретения желаемой цели и сводится к нахождению математических зависимостей между ними для последующей многокритериальной оптимизации и принятия оптимальных решений.

Система любой физической природы, социальная, производственная (любая исследуемая сфера деятельности и производства, предметная область), предоставление товара, услуги и т. д. описывается:

Вектор выходных параметров $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ или критерий $Q(y_1, \dots, y_m)$ оценки состояния (качество продукции, услуги, производительность, себестоимость, к.п.д. и т. п.).

Компоненты вектора Y в общем случае являются функциями характеристик:

Входные потоки $G = \{g_1, \dots, g_r\}$.

Параметры состояния системы $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, (зависящие от факторов возмущения).

Факторы возмущения $V = \{v_1, \dots, v_q\}$.

Управляющие воздействия $U = \{u_1, \dots, u_p\}$.

Для представления структурированного множества контролируемых параметров и связей взаимодействующих элементов и блоков системы строится матричная структурно-параметрическая модель (рис. 2.6.1).

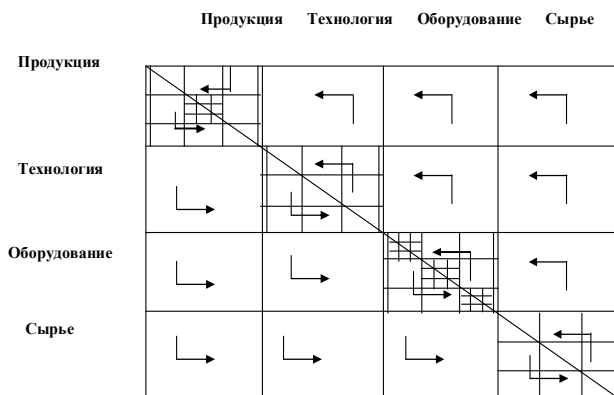


Рис. 2.6.1. Структурная матричная модель системы
(на примере производственного процесса)

Построение структурно-параметрической модели исследуемого процесса (объекта), связанное с представлением его в виде системы взаимосвязанных параметров, взаимодействующих элементов и подсистем и в то же время в виде подсистемы некоторой внешней, скажем производственной системы, сводится к следующим этапам:

1. Описание внешней системы (внешней среды, инфраструктуры), в которую исследуемый или проектируемый процесс входит в качестве составного элемента.
2. Разработка крупноблочной модели матрицы системы (рис. 2.6.2), каждый блок которой описывает параметры состояния функциональных подсистем и их локальные и общие цели.
3. Детализация элементов крупноблочной матрицы, при которой каждый диагональный блок может быть разделен на более

мелкие составные элементы или подсистемы с детализацией внешних факторов и их влияния на элементы и подсистемы.

4. Составление параметрических моделей структурных элементов системы в виде набора векторов входных и выходных факторов и параметров состояния и заполнение главной диагонали структурно-параметрической матрицы системы векторами параметров состояния и наблюдения.

5. Определение сопоставимых характеристик связей и взаимодействия между элементами, блоками и подсистемами большой системы методами факторного анализа, планирования эксперимента, экспертных оценок и другими в зависимости от глубины априорных данных о природе вещей.

Рис. 2.6.2. отражает входные параметры и выходные целевые функции перехода на вышестоящий уровень:

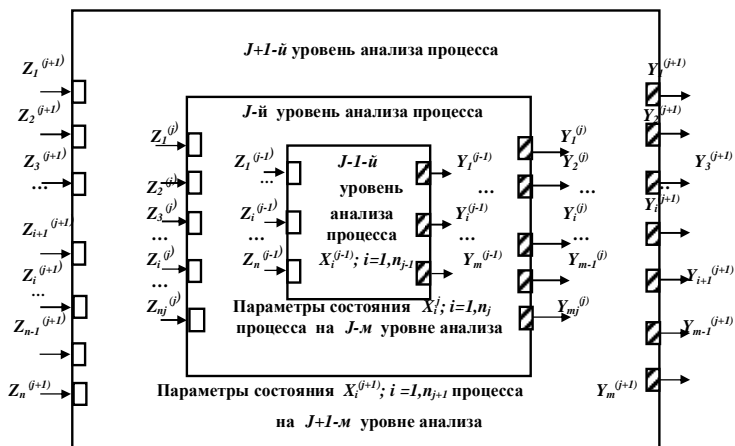


Рис. 2.6.2. Структурная схема многоуровневого параметрического описания процесса на трех смежных $j+1$ -м, j -м и $j-1$ -м уровнях

$Z_i^{(j+1)}, Y_i^{(j+1)}, X_i^{(j+1)}$ — i -й параметр входа, выхода и состояния $j+1$ -го уровня некоторой внешней системы и сводится к следующему этапу.

Анализ процесса любой предметной области позволяет создать структурно-параметрическую матричную модель, эффекты взаимодействия элементов и подсистем системы, ее чувствительность к различным возмущениям и возможности управления процессом на разных этапах.

Эффективность технологии процесса, обеспечивающая выработку продукции заданного ассортимента с заданными свойствами и параметрами, связаны с нахождением экстремума некоторого функционала качества.

При этом все изменяемые параметры приводятся к безразмерной шкале относительных величин:

$$z_i = \frac{x_i - x_i^0}{\Delta x_{ik}^0}, \quad (2.6.1)$$

где x_{ij} , x_{ij}^0 — фактическое и эталонное значение j -го параметра в i -й группе;

Δx_{ik}^0 — предельно допустимое отклонение от нормы.

Критерий оценки состояния системы представляется в виде аддитивно-мультипликативной свертки:

$$Q = \prod_{k=1}^{m_k} (1 - z_k^2) \cdot \left[\sum_{i=1}^m a_i \left(1 - \sqrt{\sum_{j=1}^{n_j} b_{ij} z_{ij}^2} \right) \right], \quad (2.6.2)$$

где $z_{ij} = \frac{x_i - x_i^0}{\Delta x_i}$ и b_{ij} — относительное отклонение j -го фактора

i -го блока системы и его весовой коэффициент;

x_i , x_i^0 — фактическое и желаемое значение параметра состояния;

Δx_i — допустимое отклонение параметра от желаемого значения;

a_i — коэффициент значимости i -й группы факторов;

z_k — отклонение k -го фактора критической группы, определяющей неприемлемость качественного состояния системы.

$$\text{При } \sum_{i=1}^m a_i = 1 \text{ и } \sum_{j=1}^{n_j} b_{ij} = 1; \quad i = \overline{1, m} \text{ функционал} \quad (2.6.3)$$

изменяется от единицы до нуля, соответственно, от эталонного состояния до его граничного допустимого значения и обращается в нуль при выходе любого параметра критической группы за предельно допустимый уровень.

Для оценки групповых и индивидуальных весовых коэффициентов формируется таблица экспертных оценок функционала по схеме полного или дробного факторного эксперимента с последующим вычислением оценок линейных эффектов влияния на функционал по формулам:

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N z_{ik} Q_k$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N z_{ijk} Q_k; \quad j = \overline{1, n_i}; \quad i = \overline{1, m}$$
(2.6.4)

где z_{ik} — значение i -го группового показателя в k -м опыте;

z_{ijk} — значение j -ой переменной i -й группы в k -м эксперименте;

Q_k — значение функционала в k -м эксперименте.

При выходе за рамки ограничения любого параметра критической группы Z_k функционал обращается в нуль. При нахождении критических показателей в норме значение критерия изменяется от 1 при полном совпадении измеряемых значений с эталонными (лучшее качество) до 0 при достижении границы нижнего уровня качества (предельное значение).

Для определения весовых коэффициентов и градуированной шкалы обобщенного функционала используется методика экспертных оценок или полного факторного эксперимента. При этом значение функционала качества продукта градуируется от 1 до 0 по шкале желательности соответственно от самого высокого до удовлетворительного уровня качества по результатам экспертных оценок, например 1,0–0,7 *очень хорошо*; 0,7–0,4 *хорошо*; 0,4–0,2 *удовлетворительно*; 0,2–0,0 *плохо*.

Формализованная квалиметрическая модель может быть использована для оценки качества процесса на каждом уровне структурно-параметрического описания в иерархии системно-аналитических исследований процессов, где возможна оценка качества продукции.

Таблица 2.6.1

**Фрагмент экспертных и статистических характеристик
связей в структурно-параметрической модели**

№	Параметры состояния	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
Параметры сырья																
1	Содержание белка, X_1 , %	1														
2	Содержание жира, X_2 , %		1													
3	Содержание витаминов, X_3 , %		(+)	1												
4	Содержание влаги, X_4 , %	*		(+)	1											
5	Цена сырья, руб.		(+)	(+)	(-)	1	(+)									
6	Себестоимость, руб.	(+)			*		1									
7	Органолептические показатели, X_7 , балл	*	*	*	*	*	*	1								
8	Затраты на производство		*			*			1				*	*		*
9			*	(+)	(+)	(-)	*	*		1		*				
Технико-экономические показатели процесса производства																
10	Производительность оборудования,		*				*	*			1			(+)		(+)
11	Товарооборот			*	(+)			(+)	(+)			1				
Показатели готового продукта																
12	Органолептические показатели продукта, X_{12} , балл	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1	*	*	
		(-)	(-)	(-)	(-)				(-)	(-)	(-)	(-)		(-)	(-)	
13	Цена готовой продукции	*				*	*	*	*	*	*	*		1		
		(-)	(+)	(+)			(-)	(-)		(-)	(-)	(-)				

Показатели готового продукта													
14	Содержание жира, X_{14} , %	(+)	*	*			*	*	*		*		1
15	Содержание витаминов, X_{15} , %		*	*				*	*	*	*	*	1
				(-)				(-)	(-)		(-)		

Наличие связи между факторами устанавливается с помощью коэффициентов корреляции и регрессии. На базе статистических данных X_{kj} ; $k = 1, n$; $j = 1, m$ для m -параметров в n наблюдениях формируется матрица коэффициентов корреляции между параметрами состояния системы:

$$r_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\bar{x}_i - x_{ki})(\bar{x}_j - x_{kj}) / \sqrt{S_{x_i}^2} \sqrt{S_{x_j}^2}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j \quad (2.6.5)$$

где \bar{x}_i, \bar{x}_j — среднее значение i -го и j -го факторов;

$S_{x_i}^2, S_{x_j}^2$ — дисперсии i -го и j -го факторов.

Для получения сопоставимых характеристик влияния и связей между параметрами матрица коэффициентов регрессии пересчитывается в матрицу безразмерных сопоставимых характеристик связей:

$$x_i = P_{i0} + \sum_{j=1}^{m_i} P_{i \text{ ind } j} x_{\text{ind } j}; \quad i = \overline{1, m} \quad (2.6.6)$$

$$c_{ij} = P_{ij} \frac{\sigma_j}{\sigma_i}; \quad i, j = \overline{1, m}; \quad i \neq j$$

где σ_i, σ_j — среднеквадратичные отклонения i -го и j -го факторов от математического ожидания;

X_b, X_j ; P_{ij} — коэффициент линейной множественной регрессии между i -м и j -м факторами.

Умножая априорно известную матрицу взаимосвязей: c_{ij} ; $i, j = \overline{1, n}$ на диагональную матрицу отклонений $\|\Delta x_j \delta_{jk}\|$ показателей состояния $\Delta x_1, \dots, \Delta x_n$, получаем *ситуационную структурно-параметрическую модель* технологического процесса в текущий момент:

$$\left\| \begin{array}{cccc} \Delta x_1, & c_{12} \Delta x_2, & \dots, & c_{1n} \Delta x_n \\ c_{21} \Delta x_1, & \Delta x_2, & \dots, & c_{2n} \Delta x_n \\ \dots, & \dots, & \dots, & \dots \\ c_{n1} \Delta x_1, & c_{n2} \Delta x_2, & \dots, & \Delta x_n \end{array} \right\| \quad (2.6.7)$$

где $\Delta x_i = \frac{x_i - x_i^0}{\Delta x_{ik}^0}$ — вектор текущих относительных отклонений;

x_{ij}, x_{ij}^0 — фактическое и эталонное значение j -го параметра в i -й группе;

Δx_{ik}^0 — предельно допустимое отклонение от нормы.

Элементы главной диагонали ситуационной матрицы отображают текущие отклонения Δx_i наблюдаемых факторов от заданных значений (то есть собственно *аномальное состояние*), а недиагональные вклады Δx_j , $j = \overline{1, n}$ в отклонение Δx_i , $i = \overline{1, n}$ с упорядочиванием по строкам всех априорно известных причин отклонения Δx_i , а по столбцам — возможных следственных влияний отклонений Δx_j на другие параметры.

Ситуационные модели позволяют *прогнозировать* состояние системы и оценивать возможность достижения заданных показателей готовой продукции при различных параметрических аномалиях процесса и среды.

Прогнозирование заключается в выявлении причинно-следственных последствий отклонений тех или иных параметров процесса от установленных норм, путем сравнения элементов столбцов ситуационной матрицы.

Контрольные вопросы

1. В чем суть методики машинного моделирования систем?

2. Какие требования пользователь предъявляет к машинной модели системы?
3. Что называется концептуальной моделью системы?
4. Какие группы блоков выделяются при построении блочной конструкции модели системы?
5. Каковы основные принципы построения моделирующих алгоритмов процессов функционирования систем?
6. Какие схемы используются при разработке алгоритмического и программного обеспечения машинного моделирования?
7. Какие циклы можно выделить в моделирующем алгоритме?
8. Что называется прогоном модели?
9. Какая техническая документация оформляется по каждому этапу моделирования системы?
10. Что такое структурно-параметрическое моделирование?
11. Что такое установление диагноза системы?
12. Что такое прогнозирование функционирования системы?
13. Что такое матрица аномальных ситуаций?
15. Приведите примеры схемы моделирующих алгоритмов.
16. Перечислите этапы построения структурно-параметрической модели.

3. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ НА ЭВМ. СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

В практике моделирования систем информатики наиболее часто приходится иметь дело с объектами, которые в процессе своего функционирования содержат элементы стохастичности или подвергаются стохастическим 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 вероятностей. 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 воздействий на элементы моделируемой системы.

3.1. Стохастические системы и возможности их компьютерного моделирования

Дискретно-стохастические модели. Основные соотношения

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 (*Р-схем*) 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 крите-

рию дискретных стохастических систем, удовлетворяющих заданным ограничениям.

Введем математическое понятие Р-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 ϕ и ψ то с их помощью осуществляются отображения $G \rightarrow Z$ и $G \rightarrow Y$, то говорят, что $F = \langle Z, X, Y, \phi, \psi \rangle$ определяет автомат детерминированного типа. Введем в рассмотрение более общую математическую схему. Пусть Φ — множество всевозможных пар вида (z_k, y_j) , где y_j — элемент выходного подмножества Y . Потребуем, чтобы любой элемент множества G индуцировал на множестве Φ некоторый закон распределения следующего вида:

Элементы из Φ	...	(z_1, y_1) ...	(x_1, y_2)...	...	(z_K, y_{j-1})	(z_K, y_j)
(x_b, z_k)	...	$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	...	$b_{K(j-1)}$	b_{Kj}

При этом $\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J b_{kj} = 1$, где b_{kj} вероятности перехода автомата в

состояние z_k и появление 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 (Р-автоматом).

Пусть элементы множества G индуцируют некоторые законы распределения на подмножествах Y и Z , что можно представить соответственно в виде:

Элементы из $Y(x_i, z_s)$	.....	$y_1 q_1$	$y_2 q_2$	.....	$y_{3-1} q_{3-1}$	$y_3 q_3$
Элементы из $Z(x_i, z_s)$	.....	$z_1 z_1$	$z_2 z_2$	.....	$z_{K-1} z_{K-1}$	$z_K z_K$

При этом $\sum_{k=1}^K z_k = 1$ и $\sum_{j=1}^J q_j = 1$, где z_k и q_k — вероятности пере-

хода Р-автомата в состояние z_k и появления выходного сигнала y_k

при условии, что Р-автомат находился в состоянии z_s , и на его вход поступил входной сигнал x_i .

Если для всех K и Y имеет место соотношение $q_k z_i = b_{kj}$, то такой Р-автомат называется вероятностным автоматом Мили. Это требование означает выполнение условия независимости распределений для нового состояния Р-автомата и его выходного сигнала. Пусть теперь определение выходного сигнала Р-автомата зависит лишь от того состояния, в котором находится автомат в данном такте работы. Другими словами, пусть каждый элемент выходного подмножества Y индуцирует:

$$\text{Элементы из } Y_z K \quad \dots \quad y_1 s_1 \quad y_2 s_2 \quad \dots \quad y_{K-1} s_{I-1} \quad y_K s_I$$

Здесь $\sum_{i=1}^I s_i = 1$, где s_i — вероятность появления выходного сигнала y_i , при условии, что Р-автомат находился в состоянии z_k .

Возможные приложения

Если для всех K и I имеет место соотношение $z_k s_i = b_{ki}$ то такой Р-автомат называется вероятностным автоматом Мура. Понятие Р-автоматов Мили и Мура введено по аналогии с детерминированным F -автоматом, задаваемым $P = \langle Z, X, Y, \varphi, \psi \rangle$. Частным случаем P -автомата, задаваемого как $P = \langle Z, X, Y, B \rangle$ являются автоматы, у которых либо переход в новое состояние, либо выходной сигнал определяются детерминированно.

Если выходной сигнал Р-автомата определяется детерминированно, то такой автомат называется Y -детерминированным вероятностным автоматом. Аналогично, Z -детерминированным вероятностным автоматом называется Р-автомат, у которого выбор нового состояния является детерминированным.

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, разрабо-

танных в теории массового обслуживания и различных приложениях для формализации процессов функционирования систем, которые по своей сути являются процессами обслуживания.

Основные соотношения

В качестве процесса обслуживания могут быть представлены различные по своей физической природе процессы функционирования экономических, производственных, технических и других систем, например потоки поставок продукции некоторому предприятию, потоки деталей и комплектующих изделий на сборочном конвейере цеха, заявки на обработку информации ЭВМ от 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, то есть стохастический характер процесса их функционирования.

Остановимся на основных понятиях массового обслуживания, необходимых для использования Q -схем, как при аналитическом, так и при имитационном.

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 Π_i (рис. 3.1.1), 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 Π_i поступают потоки событий: в накопитель H_i — поток заявок w_i , на канал K_i — поток обслуживания u_i .

Потоком событий называется последовательность событий, происходящих одно за другим в какие-то случайные моменты времени. Различают потоки однородных и неоднородных событий. Поток событий называется однородным, если он характеризуется только моментами поступления этих событий (вызывающими моментами) и задается последовательностью: $\{t_n\} = \{0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n \leq \dots\}$, где t_n — момент наступления n -го события — неотрицательное вещественное число.

Однородный поток событий также может быть задан в виде последовательности промежутков времени между $n - m$ и $(n - 1) - m$ событиями $\{\tau_n\}$, которая однозначно связана с последовательностью вызывающих моментов $\{t_n\}$, где $\tau_n = t_n - t_{n-1}$, $n \geq 1$, $t_0 = 0$, т. е. $\tau_1 = t_1$

Потоком неоднородных событий называется последовательность $\{t_n, f_n\}$, где t_n — вызывающие моменты; f_n — набор признаков события. Например, применительно к процессу обслуживания для неоднородного потока заявок могут быть заданы принадлежность к тому или иному источнику заявок, наличие приоритета, возможность обслуживания тем или иным типом канала и т. п.

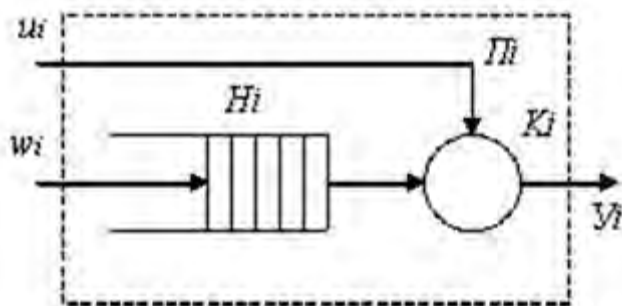


Рис. 3.1.1. Прибор обслуживания заявок

Возможные приложения

Обычно в приложениях при моделировании различных систем применительно к элементарному каналу обслуживания K_i , можно считать, что поток заявок $w_i \in W$, то есть интервалы времени между моментами появления заявок (вызывающие моменты) на входе K_i образует подмножество неуправляемых переменных, а поток обслуживания $u_i \in U$, то есть интервалы времени между началом и окончанием обслуживания заявки, образует подмножество управляемых переменных.

Заявки, обслуженные каналом K_i , и заявки, покинувшие прибор Π_i по различным причинам необслуженными (например, из-за пе-

реполнения накопителя H_i), образуют выходной поток $y_i \in Y$, то есть. интервалы времени между моментами выхода заявок образуют подмножество выходных переменных.

Процесс функционирования прибора обслуживания Π_i можно представить как процесс изменения состояний его элементов во времени $z_i(t)$. Переход в новое состояние для Π_i означает изменение количества заявок, которые в нем находятся (в канале K_i и в накопителе H_i). Таким образом, вектор состояний для Π_i имеет вид $\vec{z}_i = (z_i^H, z_i^K)$, где $z_i H$ — состояние накопителя H_i , ($z_i H = 0$ — накопитель пуст, $z_i H = 1$ — в накопителе имеется одна заявка, ..., $z_i H = L_i H$ — накопитель полностью заполнен); $L_i H$ — емкость накопителя H_i , измеряемая числом заявок, которые в нем могут поместиться; $z_i K$ — состояние канала K_i ($z_i K = 0$ — канал свободен, $z_i K = 1$ — канал занят и т. д.).

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 Π_i (сети массового обслуживания). Если каналы K_i различных приборов обслуживания соединены параллельно, то имеет место многоканальное обслуживание (многоканальная Q -схема), а если приборы Π_i и их параллельные композиции соединены последовательно, то имеет место многофазное обслуживание (многофазная Q -схема). Таким образом, для задания Q -схемы необходимо использовать оператор сопряжения R , отражающий взаимосвязь элементов структуры (каналов и накопителей) между собой.

Связи между элементами Q -схемы изображают в виде стрелок (линий потока, отражающих направление движения заявок). Различают разомкнутые и замкнутые Q -схемы. В разомкнутой Q -схеме выходной поток обслуженных заявок не может снова поступить на какой-либо элемент, то есть обратная связь отсутствует, а в замкнутых Q -схемах имеются обратные связи, по которым заявки двигаются в направлении, обратном движению вход-выход. Собственными (внутренними) параметрами Q -схемы будут яв-

ляться количество фаз L_Φ , количество каналов в каждой фазе L_{kj} , $j = \overline{1, L_\Phi}$, количество накопителей каждой фазы L_{Hk} , $k = \overline{1, L^\Phi}$ емкость i -го накопителя L_iH . Следует отметить, что в теории массового обслуживания в зависимости от емкости накопителя применяют следующую терминологию для систем массового обслуживания: системы с потерями ($L_iH =$, то есть накопитель в приборе Π_i , отсутствует, а имеется только канал обслуживания K_i), системы с ожиданием ($L_iH \rightarrow \infty$, то есть накопитель H_i имеет бесконечную емкость и очередь заявок не ограничивается) и системы смешанного типа (с ограниченной емкостью накопителя H_i). Всю совокупность собственных параметров Q -схемы обозначим как подмножество H .

Для задания Q -схемы также необходимо описать алгоритмы ее функционирования, которые определяют набор правил поведения заявок в системе в различных неоднозначных ситуациях. В зависимости от места возникновения таких ситуаций различают алгоритмы (дисциплины) ожидания заявок в накопителе H_i и обслуживания заявок каналом K_i каждого элементарного обслуживающего прибора Π_i Q -схемы. Неоднородность заявок, отражающая процесс в той или иной реальной системе, учитывается с помощью введения классов приоритетов.

В зависимости от динамики приоритетов в Q -схемах различают статические и динамические приоритеты. Статические приоритеты назначаются заранее и не зависят от состояний Q -схемы, то есть они являются фиксированными в пределах решения конкретной задачи моделирования. Динамические приоритеты возникают при моделировании в зависимости от возникающих ситуаций. Исходя из правил выбора заявок из накопителя H_i на обслуживание каналом K_i можно выделить относительные и абсолютные приоритеты. Относительный приоритет означает, что заявка с более высоким приоритетом, поступившая в накопитель H_i , ожидает окончания обслуживания предшествующей заявки каналом K_i и только после этого занимает канал. Абсолютный приоритет означает, что заявка с более высоким приоритетом, поступившая в накопитель H_i , прерывает обслуживание каналом K_i заявки с более низким

приоритетом и сама занимает канал (при этом вытесненная из K_i заявка может либо покинуть систему, либо может быть снова записана на какое-то место в H_i).

При рассмотрении алгоритмов функционирования приборов обслуживания Π_i (каналов K_i и накопителей H_i необходимо также задать набор правил, по которым заявки покидают H_i и K_i : для H_i — либо правила переполнения, по которым заявки в зависимости от заполнения H_i покидают систему, либо правила ухода, связанные с истечением времени ожидания заявки в H_i , для K_i — правила выбора маршрутов или направлений ухода. Кроме того, для заявок необходимо задать правила, по которым они остаются в канале K_i или не допускаются до обслуживания каналом K_i , то есть правила блокировок канала. При этом различают блокировки K_i по выходу и по входу. Такие блокировки отражают наличие управляющих связей в Q -схеме, регулирующих поток заявок в зависимости от состояний Q -схемы. Весь набор возможных алгоритмов поведения заявок в Q -схеме можно представить в виде некоторого оператора алгоритмов поведения заявок A .

Таким образом, Q -схема, описывающая процесс функционирования системы массового обслуживания любой сложности, однозначно задается в виде $Q = \langle W, U, H, Z, R, A \rangle$.

При ряде упрощающих предположений относительно подмножеств входящих потоков WVL потоков обслуживания U (выполнение условий стационарности, ординарности и ограниченного последействия) оператора сопряжения элементов структуры R (однофазное одноканальное обслуживание в разомкнутой системе), подмножества собственных параметров H (обслуживание с бесконечной емкостью накопителя), оператора алгоритмов обслуживания заявок A (бесприоритетное обслуживание без прерываний и блокировок) для оценки вероятностно-временных характеристик можно использовать аналитический аппарат, разработанный в теории массового обслуживания. При принятых предположениях в обозначениях Д. Кендалла будет иметь место классическая система обслуживания типа $M/M/1$ (одноканальная система с марковским входящим потоком заявок и марковским потоком обслуживания). Рассмотрим на примере основные аналитические соотношения для такой элементарной Q -схемы.

3.2. Датчики случайных чисел. Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло

Специальный метод изучения поведения заданной статистики при проведении многократных повторных выборок, существенно использующий вычислительные возможности современных компьютеров. При проведении анализа по методу Монте-Карло компьютер использует процедуру генерации псевдослучайных чисел для имитации данных из изучаемой генеральной совокупности. Процедура анализа по методу Монте-Карло модуля Моделирование структурными уравнениями строит выборки из генеральной совокупности в соответствии с указаниями пользователя, а затем производит следующие действия, для каждого повторения по методу Монте-Карло:

1. Имитирует случайную выборку из генеральной совокупности.
2. Проводит анализ выборки.
3. Сохраняет результаты.

После большого числа повторений, сохраненные результаты хорошо имитируют реальное распределение выборочной статистики. Метод Монте-Карло позволяет получить информацию о выборочном распределении в случаях, когда обычная теория выборочных распределений оказывается бессильной.

На ЭВМ невозможно получить идеальную последовательность случайных чисел хотя бы потому, что на ней можно оперировать только с конечным множеством чисел. Кроме того, для получения значений x случайной величины ξ используются формулы (алгоритмы). Поэтому такие последовательности, являющиеся по своей сути детерминированными, называются псевдослучайными.

Требования к генератору случайных чисел

Прежде чем перейти к описанию конкретных алгоритмов получения на ЭВМ последовательностей псевдослучайных чисел, сформулируем набор требований, которым должен удовлетворять идеальный генератор. Полученные с помощью идеального генератора псевдослучайные последовательности чисел должны состоять из квазиравномерно распределенных чисел, содержать статистиче-

ски независимые числа, быть воспроизводимыми, иметь неповторяющиеся числа, получаться с минимальными затратами машинного времени, занимать минимальный объем машинной памяти.

Наибольшее применение в практике моделирования на ЭВМ для генерации последовательностей псевдослучайных чисел находят алгоритмы вида:

$$X_i + 1 = \Phi(x_i) \quad (3.2.1)$$

представляющие собой рекуррентные соотношения первого порядка, для которых начальное число x_0 и постоянные параметры заданы.

Например, легко показать, что функция вида (3.2.1), не может породить хорошую последовательность псевдослучайных чисел x_1, x_2, \dots . Действительно, если построить точки с координатами $(x_1, x_2), (x_3, x_4)$ по случайным числам, полученная случайными числами, то они будут равномерно распределены в единичном квадрате $0 \leq x_i \leq 1, 0 \leq x_{i+1} \leq 1$. Соответствующие же точки, построенные по числам $(x_1, \Phi(x_2)), (x_3, \Phi(x_4)), \dots$ располагаются в площади, ограниченной кривой $x_i + 1 = \Phi(x_i)$.

Хорошую последовательность случайных чисел может породить только такая функция $x_i + 1 = \Phi(x_i)$, график которой достаточно плотно заполняет единичный квадрат. Примером такой функции может служить $x_i + 1 = D(Ax_i)$ при больших целых положительных A , где $D(i) = i - C(i)$ — дробная часть числа i ; $C(i)$ — целая часть числа i , то есть наибольшее целое число, не превосходящее i . Пусть для примера $A = 10$, тогда функция $x_i + 1 = \Phi(x_i)$ будет иметь другой вид, приведенные условия являются только необходимыми, но не достаточными для того, чтобы соотношение (3.2.1) порождало хорошие последовательности псевдослучайных чисел.

3.3. Имитация случайных событий при имитационных экспериментах со стохастическими системами

Статистическое моделирование системы — один из основных, учитывающий стохастические воздействия. Количество случайных чисел, используемых для получения статистически устойчивой оценки характеристики процесса функционирования системы S ,

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.

Рассмотрим возможности и особенности получения последовательностей случайных чисел при статистическом моделировании систем на ЭВМ. На практике используются три основных способа генерации случайных чисел: аппаратный (физический), табличный (файловый) и алгоритмический (программный).

Аппаратный способ

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

Возможны и другие схемные решения аппаратных генераторов случайных чисел. Однако аппаратный способ получения случайных чисел не позволяет гарантировать качество последовательности непосредственно во время моделирования системы **S** на ЭВМ, а также повторно получать при моделировании одинаковые последовательности чисел.

Табличный способ

Если случайные числа, оформленные в виде таблицы, помещать во внешнюю или оперативную память ЭВМ, предварительно сформировав из них соответствующий файл (массив чисел), то такой способ будет называться табличным. Однако этот способ получения случайных чисел при моделировании систем на ЭВМ обычно рационально использовать при сравнительно небольшом объеме таблицы и соответственно файла чисел, когда для хранения можно применять оперативную память. Хранение файла во внешней памяти при частном обращении в процессе статистического моделирования не рационально, так как вызывает увеличение затрат машинного времени при моделировании системы S из-за необходимости обращения к внешнему накопителю. Возможны промежуточные способы организации файла, когда он переписывается в оперативную память периодически по частям. Это уменьшает время на обращение к внешней памяти, но сокращает объем оперативной памяти, который можно использовать для моделирования процесса функционирования системы S .

Алгоритмический способ

Способ получения последовательностей случайных чисел основан на формировании случайных чисел в ЭВМ с помощью специальных алгоритмов и реализующих программ.

Каждое случайное число вычисляется с помощью соответствующей программы по мере возникновения потребностей при моделировании системы на ЭВМ.

Таблица 3.3.1

Сравнительный анализ способов генерации случайных чисел

Способ	Достоинства	Недостатки
1	2	3
Аппаратный	Запас чисел не ограничен. Расходуется мало операций вычислительной машины. Не занимает место в памяти машины	Требуется периодическая проверка. Нельзя производить последовательность. Используется специальное устройство. Необходимы меры по обеспечению стабильности

1	2	3
Табличный	Требуется однократная проверка. Можно воспроизводить последовательность	Запас чисел. Занимает много места в оперативной памяти или необходимо время на обращение к внешней памяти
Алгоритмический	Требуется однократная проверка. Можно многократно воспроизводить последовательность чисел. Занимает мало места в памяти машины. Не используются внешние устройства	Запас чисел последовательности ограничен ее периодом. Существенные затраты машинного времени

Достоинства и недостатки трех перечисленных способов получения случайных чисел для сравнения представлены в табл. 3.3.1. Из этой таблицы видно, что алгоритмический способ получения случайных чисел наиболее рационален на практике при моделировании систем на универсальных ЭВМ.

3.4. Общая характеристика СМО-моделирования на ЭВМ

В терминах систем массового обслуживания (СМО) описываются многие реальные системы: вычислительные системы, узлы сетей связи, системы посадки самолетов, магазины, производственные участки, любые системы, где возможны очереди и (или) отказы в обслуживании.

В вычислительной системе роль обслуживающего прибора играет ЭВМ — роль заявок, решаемые задачи. Источником заявок служат терминалы пользователей. Моментом выдачи заявки является момент нажатия клавиши для подачи директивы о запуске задачи на решение. Операционная система ЭВМ исполняет роль диспетчера: определяет очередность решения задач. В роли ячеек буфера выступают ячейки памяти ЭВМ, хранящие сведения о задачах, требующих решения.

В системе разгрузки судна, другой пример реальной системы, источниками заявок являются направления, откуда прибывают суда. Момент выдачи заявки — это момент прибытия судна в зону морского порта для разгрузки/погрузки. Обслуживающим прибором является причал вместе с персоналом и техническими средствами, организующими разгрузку/погрузку. Роль буфера играет акватория порта. Усложнение структур и режимов реальных систем затрудняет применение классических методов теории массового обслуживания ввиду возрастающей размерности решаемых задач, что особенно характерно для систем с сетевой структурой. Одним из возможных путей преодоления размерности является использование моделей в форме сетей массового обслуживания (СеМО).

3.5. Примеры систем и сетей массового обслуживания

Сети массового обслуживания

Сеть массового обслуживания представляет собой совокупность конечного числа N обслуживающих узлов, в которой циркулируют заявки, переходящие в соответствии с маршрутной матрицей из одного узла в другой. Узел всегда является разомкнутой СМО (причем СМО может быть любого класса). При этом отдельные СМО отображают функционально самостоятельные части реальной системы, связи между СМО, структуру системы, а требования, циркулирующие по СеМО, составляющие материальные потоки (сообщения (пакеты) в коммуникационной сети, задания в мультипроцессорных системах, контейнеры грузопотоков и т. п.).

Для наглядного представления СеМО используется граф, вершины которого (узлы) соответствуют отдельным СМО, а дуги отображают связи между узлами.

Переход заявок между узлами происходит мгновенно в соответствии с переходными вероятностями $P_{ij}, i, j = 1, N$, p_{ij} , вероятность того, что заявка после обслуживания в узле i перейдет в узел j . Естественно, если узлы непосредственно не связаны между со-

бой, то $p_{ij} = 0$. Если из i -го узла переход только в один какой-либо узел j , то $p_{ij} = 1$.

СеМО классифицируют по нескольким признакам (рис. 3.5.1).

Сеть называется линейной, если интенсивности потоков заявок в узлах связаны между собой линейной зависимостью

$$I_j = a_{ij} I_i,$$

где a_{ij} — коэффициент пропорциональности, или относительно источника

$$I_j = a_{ij} I_0.$$

Коэффициент a_j называют коэффициентом передачи, он характеризует долю заявок, поступающих в j -й узел от источника заявок, либо — среднее число прохождений заявкой через данный узел за время нахождения заявки в сети.

Если интенсивности потоков заявок в узлах сети связаны нелинейной зависимостью (например, $\lambda_j = \sqrt{a_j \lambda_0}$), то сеть называется нелинейной.

Сеть всегда линейна, если в ней заявки не теряются и не размножаются.

Разомкнутая сеть — это такая открытая сеть, в которую заявки поступают из внешней среды и уходят после обслуживания из сети во внешнюю среду. Другими словами, особенностью разомкнутой СеМО (РСеМО) является наличие одного или нескольких независимых внешних источников, которые генерируют заявки, поступающие в сеть, независимо от того, сколько заявок уже находится в сети. В любой момент времени в РСеМО может находиться произвольное число заявок (от 0 до ∞).

В замкнутой СеМО (ЗСеМО) циркулирует фиксированное число заявок, а внешний независимый источник отсутствует. Исходя из физических соображений, в ЗСеМО выбирается внешняя дуга,

на которой отмечается псевдонулевая точка, относительно которой могут измеряться временные характеристики.

Комбинированная сеть — это сеть, в которой постоянно циркулирует определенное число заявок и есть заявки, поступающие от внешних независимых источников.

В однородной сети циркулируют заявки одного класса. И, наоборот, в неоднородной сети могут присутствовать заявки нескольких классов. Заявки относятся к разным классам, если они различаются хотя бы одним из следующих атрибутов:

- законом распределения длительности обслуживания в узлах;
- приоритетами;
- маршрутами (путями движения заявок в сети).



Рис. 3.5.1. Классификация сетей массового обслуживания

В экспоненциальной сети длительности обслуживания во всех узлах распределены по экспоненциальному закону, и потоки, поступающие в разомкнутую сеть, простейшие (пуассоновские). Во всех остальных случаях сеть является неэкспоненциальной.

Если хотя бы в одном узле осуществляется приоритетное обслуживание, то это — приоритетная сеть. Приоритет — это при-

знак, определяющий очередность обслуживания. Если обслуживание заявок в узлах осуществляется в порядке поступления, то такая сеть бесприоритетная.

Таким образом, экспоненциальной будем называть СеМО, отвечающую требованиям:

- входные потоки СеМО пуассоновские;
- во всех N СМО время обслуживания заявок имеет экспоненциальную функцию распределения вероятностей, и заявки обслуживаются в порядке прихода;
- переход заявки с выхода i -й СМО на вход j -й является независимым случайным событием, имеющим вероятность P_{ij} , $i, j = \overline{1, N}$; P_{i0} вероятность ухода заявки из СеМО.

Если заявки приходят в сеть и уходят из нее, то сеть называется разомкнутой. Если заявки не приходят в сеть и из нее не уходят, сеть называется замкнутой. Число заявок в замкнутой сети постоянное.

Системы массового обслуживания

Понятие о задачах теории массового обслуживания.

Многие экономические организации и системы, получающие прибыль за счет обслуживания клиентов, можно достаточно точно описать с помощью совокупности математических методов и моделей, которые получили название теории массового обслуживания (ТМО).

С позиции моделирования процесса массового обслуживания ситуации, когда образуются очереди заявок (требований) на обслуживание, возникают следующим образом. Поступив в обслуживающую систему, требование присоединяется к очереди других (ранее поступивших) требований. Канал обслуживания выбирает требование из находящихся в очереди, с тем, чтобы приступить к его обслуживанию. После завершения процедуры обслуживания очередного требования канал обслуживания приступает к обслуживанию следующего требования, если таковое имеется в блоке ожидания. Цикл функционирования системы массового обслуживания подобного рода повторяется многократно в течение всего периода работы обслуживающей системы. При этом предполагается, что переход системы на обслуживание очередного требова-

ния после завершения обслуживания предыдущего требования происходит мгновенно, в случайные моменты времени.

Очереди возникают практически во всех системах массового обслуживания (СМО) и теория массового обслуживания (теория очередей) занимается оценкой функционирования системы при заданных параметрах и поиском параметров, оптимальных по некоторым критериям.

Эта теория представляет особый раздел теории случайных процессов и использует, в основном, аппарат теории вероятностей. Первые публикации в этой области относятся к 20-м годам XX века и принадлежат датчанину А. Эрлангу, занимавшемуся исследованиями функционирования телефонных станций — типичных СМО, где случайны моменты вызова, факт занятости абонента или всех каналов, продолжительность разговора. В дальнейшем теория очередей нашла развитие в работах К. Пальма, Ф. Поллачека, А.Я. Хинчина, Б.В. Гнеденко, А. Кофмана, Р. Крюона, Т. Саати и других отечественных и зарубежных математиков.

В качестве основных элементов СМО следует выделить входной поток заявок, очередь на обслуживание, систему (механизм) обслуживания и выходящий поток заявок. В роли заявок (требований, вызовов) могут выступать покупатели в магазине, телефонные вызовы, поезда при подходе к железнодорожному узлу, вагоны под разгрузкой, автомашины на станции техобслуживания, самолеты в ожидании разрешения на взлет, штабель бревен при погрузке на автотранспорт. Роль обслуживающих приборов (каналов, линий) играют продавцы или кассиры в магазине, таможенники, пожарные машины, взлетно-посадочные полосы, экзаменаторы, ремонтные бригады.



Рис. 3.5.2. Пример СМО

В зависимости от характеристик этих элементов СМО классифицируются следующим образом.

По характеру поступления заявок. Если интенсивность входного потока (количество заявок в единицу времени) постоянна или является заданной функцией от времени, поток называют регулярным. Если параметры потока независимы от конкретного момента времени, поток называют стационарным.

По количеству одновременно поступающих заявок. Поток с вероятностью одновременного появления двух и более заявок равной нулю называется ординарным.

По связи между заявками. Если вероятность появления очередной заявки не зависит от количества предшествующих заявок, имеем дело с потоком без последствия.

По однородности заявок выделяют однородные и неоднородные потоки.

По ограниченности потока заявок различают замкнутые и разомкнутые системы (система с ограниченной клиентурой называется замкнутой). Так универсальный магазин является разомкнутой системой, тогда как оптовый магазин с постоянными клиентами — замкнутая система.

По поведению в очереди системы делятся на системы с отказами (заявка покидает систему, если нет мест в очереди), с ограниченным ожиданием и с ожиданием без ограничения времени.

По дисциплине выбора на обслуживание. Здесь можно выделить системы с обслуживанием в порядке поступления, в случайном порядке, в порядке, обратном поступлению (последний пришел — первым обслужен) или с учетом приоритетов.

По числу каналов обслуживания системы разделяют на одно — и многоканальные.

По времени обслуживания выделяют системы с детерминированным и случайным временем.

По количеству этапов обслуживания различают однофазные и многофазные системы.

3.6. Аналитические методы расчета характеристик пуассоновских СМО

Методы моделирования информационных сетей

Система массового обслуживания одна из основных моделей, используемых инженерами-системотехниками. Как модель, СМО рассматривается в теории массового обслуживания (другое название — теория очередей). Первые работы в этой области были вызваны потребностями практики, в частности широким развитием телефонных сетей. Поэтому в работах по теории СМО широко используется терминология, заимствованная из телефонии: требования, вызовы, заявки, каналы (приборы) обслуживания и т. п.

Теория массового обслуживания связана с разработкой и анализом математических, то есть абстрактных, моделей, которые описывают процесс обслуживания некоторых объектов, поступающих на вход обслуживающего прибора в виде некоторого потока, и образующего в общем случае очередь на входе обслуживающего прибора.

Поскольку рассматриваются абстрактные модели, совершенно не важна природа обслуживаемых объектов и их физические свойства (будь то вызовы, управляющие или информационные кадры в сети связи или посетители магазина, или детали на автоматической линии и т. п.). Существенным являются моменты появления этих объектов и правила, и законы (математические) их обслуживания, так как от этих моментов и законов зависит адекватное отображение эволюции моделируемого объекта во времени. Поэтому, когда говорят о методах анализа очередей, имеют в виду математические (абстрактные) модели, а из контекста всегда должно быть ясно, для исследования какой реальной системы применяются эти модели.

Целью использования СМО (как модели) является анализ качества функционирования указанных систем-оригиналов.

В свою очередь, СеМО используют для определения важнейших системных характеристик информационных систем: производительности; времени доставки пакетов; вероятности потери со-

общений и блокировки в узлах; области допустимых значений нагрузки, при которых обеспечивается требуемое качество обслуживания и др. В теории СеМО фундаментальным является понятие состояния сети. Важнейшая характеристика сетей МО вероятности их состояний. Для определения вероятностей состояний СеМО исследуют протекающий в сети случайный процесс. В качестве моделей протекающих в СеМО процессов наиболее часто используют марковские и полумарковские.

Марковским процессом с непрерывным временем описывают функционирование экспоненциальных СеМО. Сеть называется экспоненциальной, если входящие потоки требований в каждую СМО пуассоновские, а времена каждого этапа обслуживания, реализуемого на любой СМО-сети, имеют экспоненциальное распределение. Это позволяет считать, что этапы обслуживания независимы между собой и не зависят ни от параметров входящего потока, ни от состояния сети, ни от маршрутов следования требований.

Теория экспоненциальных СеМО наиболее разработана, и ее широко применяют как для исследования сетей ПД так и для исследования мультипроцессорных вычислительных систем (ВС). Разработаны практические формы расчета вероятностно-временных характеристик (ВВХ) таких сетей и систем.

Попытки глубокого анализа немарковских моделей сетевых систем наталкиваются на значительные трудности, которые обусловлены в частности отсутствием независимости длительностей пребывания требований в различных узлах моделей сетевых систем с нестандартными дисциплинами. Так например, при достаточно реалистическом предположении о том, что длина требования остается постоянной в процессе его передачи через узлы сети, необходимо проследивать путь каждого требования, что делает невозможным аналитический расчет характеристики для сети с числом узлов $M > 2$.

Анализ работ, посвященных исследованию или расчету немарковских моделей, показывает, что решения, как правило, получены алгоритмически путем сложных численных расчетов с использованием преобразований Лапласа-Стилтьеса, реализуются про-

граммно, отличаются большой трудоемкостью, либо значительными погрешностями в оценке показателей производительности информационных систем (ИС) в области средней и большой нагрузки. Поэтому для моделирования СеМО, выходящих из класса мультипликативных, используют приближенные методы.

Сравнительный анализ приближенных методов моделирования СеМО и примеры показывают, что пользоваться приближенными методами расчета СеМО необходимо с большой осторожностью, что при расчете конкретных СеМО в процессе решения различных прикладных задач представляется необходимым проведение исследований в целях оценки точности и чувствительности применяемого метода, а также проведение эксперимента по имитационному моделированию исходной СеМО для достаточно большого множества значений варьируемых параметров.

Таким образом, аналитические методы расчета характеристик ИС базируются, как правило, на анализе экспоненциальных СеМО. При использовании этого математического аппарата удастся получить аналитические модели для решения широкого круга задач исследования систем.

СеМО — это, прежде всего, совокупность взаимосвязанных систем массового обслуживания. Поэтому необходимо вспомнить основные особенности этих систем.

3.7. Моделирование потоков заявок в реальных системах. Моделирование станций обслуживания и очередей

Большой класс систем, которые сложно изучить аналитическими способами, но которые хорошо изучаются методами статистического моделирования, сводится к системам массового обслуживания (СМО).

В СМО подразумевается, что есть типовые пути (каналы обслуживания), через которые в процессе обработки проходят заявки. Принято говорить, что заявки обслуживаются каналами. Каналы могут быть разными по назначению, характеристикам, они могут сочетаться в разных комбинациях; заявки могут находиться в очередях и ожидать обслуживания. Часть заявок может быть об-

служена каналами, а части могут отказать в этом. Важно, что заявки, с точки зрения системы, абстрактны: это то, что желает обслужиться, то есть пройти определенный путь в системе. Каналы являются также абстракцией: это то, что обслуживает заявки.

Заявки могут приходить неравномерно, каналы могут обслуживать разные заявки за разное время и так далее, количество заявок всегда весьма велико. Все это делает такие системы сложными для изучения и управления, и проследить все причинно-следственные связи в них не представляется возможным. Поэтому принято представление о том, что обслуживание в сложных системах носит случайный характер.

Примерами СМО (см. табл. 3.7.1) могут служить: автобусный маршрут и перевозка пассажиров; производственный конвейер по обработке деталей; влетающая на чужую территорию эскадрилья самолетов, которая «обслуживается» зенитками ПВО; ствол и рожок автомата, которые «обслуживают» патроны; электрические заряды, перемещающиеся в некотором устройстве и т. д.

Таблица 3.7.1

Примеры систем массового обслуживания

СМО	Заявки	Каналы
Автобусный маршрут и перевозка пассажиров	Пассажиры	Автобусы
Производственный конвейер по обработке деталей	Детали, узлы	Станки, склады
Влетающая на чужую территорию эскадрилья самолетов, которая «обслуживается» зенитками ПВО	Самолеты	Зенитные орудия, радары, стрелки, снаряды
Ствол и рожок автомата, которые «обслуживают» патроны	Патроны	Ствол, рожок
Электрические заряды, перемещающиеся в некотором устройстве	Заряды	Каскады технического устройства

Но все эти системы объединены в один класс СМО, поскольку подход к их изучению един. Он состоит в том, что, во-первых, с помощью генератора случайных чисел разыгрываются случайные числа, которые имитируют СЛУЧАЙНЫЕ моменты появления

заявок и время их обслуживания в каналах. Но в совокупности эти случайные числа, конечно, подчинены **статистическим** закономерностям.

К примеру, пусть сказано: «заявки в среднем приходят в количестве 5 штук в час». Это означает, что времена между приходом двух соседних заявок случайны, например: 0.1; 0.3; 0.1; 0.4; 0.2, как это показано на рис. 3.7.1, но в сумме они дают в среднем 1 (обратите внимание, что в примере это не точно 1, а 1.1 — но зато в другой час эта сумма, например, может быть равной 0.9); и только за достаточно большое время среднее этих чисел станет близким к одному часу.

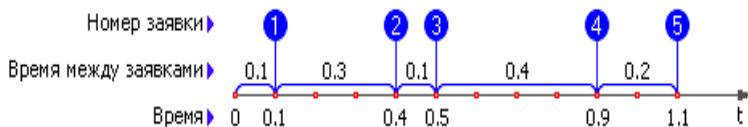


Рис. 3.7.1. Случайный процесс прихода заявок в СМО

Результат (например, пропускная способность системы), конечно, тоже будет случайной величиной на отдельных промежутках времени. Но измеренная на большом промежутке времени, эта величина будет уже, в среднем, соответствовать точному решению. То есть для характеристики СМО интересуются ответами в статистическом смысле.

Итак, систему испытывают случайными входными сигналами, подчиненными заданному статистическому закону, а в качестве результата принимают статистические показатели, усредненные по времени рассмотрения или по количеству опытов.

Во-вторых, все модели СМО собираются типовым образом из небольшого набора элементов (канал, источник заявок, очередь, заявка, дисциплина обслуживания, стек, кольцо и так далее), что позволяет имитировать эти задачи типовым образом. Для этого

модель системы собирают из конструктора таких элементов. Неважно, какая конкретно система изучается, важно, что схема системы собирается из одних и тех же элементов. Разумеется, структура схемы будет всегда различной.

Перечислим некоторые основные понятия СМО

Каналы — то, что обслуживает; бывают горячие (начинают обслуживать заявку в момент ее поступления в канал) и холодные (каналу для начала обслуживания требуется время на подготовку). Источники заявок — порождают заявки в случайные моменты времени, согласно заданному пользователем статистическому закону. Заявки, они же клиенты, входят в систему (порождаются источниками заявок), проходят через ее элементы (обслуживаются), покидают ее обслуженными или неудовлетворенными. Бывают нетерпеливые заявки — такие, которым надоело ожидать или находиться в системе и которые покидают по собственной воле СМО. Заявки образуют потоки — поток заявок на входе системы, поток обслуженных заявок, поток отказанных заявок. Поток характеризуется количеством заявок определенного сорта, наблюдаемым в некотором месте СМО за единицу времени (час, сутки, месяц), то есть поток есть величина статистическая.

Очереди характеризуются правилами стояния в очереди (дисциплиной обслуживания), количеством мест в очереди (сколько клиентов максимум может находиться в очереди), структурой очереди (связь между местами в очереди). Бывают ограниченные и неограниченные очереди. Перечислим важнейшие дисциплины обслуживания. FIFO (First In, First Out — первым пришел, первым ушел): если заявка первой пришла в очередь, то она первой уйдет на обслуживание. LIFO (Last In, First Out — последним пришел, первым ушел): если заявка последней пришла в очередь, то она первой уйдет на обслуживание (пример — патроны в рожке автомата). SF (Short Forward — короткие вперед): в первую очередь обслуживаются те заявки из очереди, которые имеют меньшее время обслуживания.

Пример, показывающий, как правильный выбор той или иной дисциплины обслуживания позволяет получить ощутимую экономию по времени.

Пусть имеется два магазина. В магазине № 1 обслуживание осуществляется в порядке очереди, то есть здесь реализована дисциплина обслуживания FIFO (см. рис. 3.7.2).

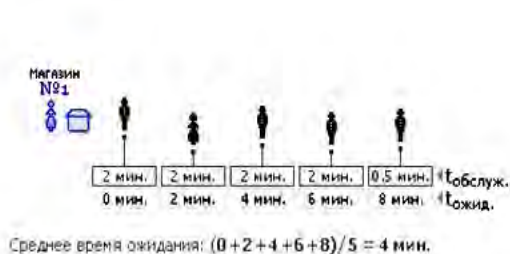


Рис. 3.7.2. Организация очереди по дисциплине FIFO

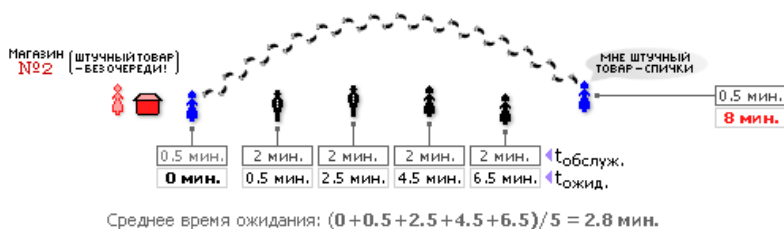


Рис. 3.7.3. Организация очереди по дисциплине SF

Время обслуживания $t_{\text{обслуж.}}$ на рис. 3.7.2 показывает, сколько времени продавец затратит на обслуживание одного покупателя. Понятно, что при покупке штучного товара продавец затратит меньше времени на обслуживание, чем при покупке, к примеру, сыпучих продуктов, требующих дополнительных манипуляций (набрать, взвесить, высчитать цену и т. п.). Время ожидания $t_{\text{ожид.}}$

показывает, через какое время очередной покупатель будет обслужен продавцом.

В магазине № 2 реализована дисциплина SF (см. рис. 3.7.3), означающая, что штучный товар можно купить вне очереди, так как время обслуживания $t_{\text{обслуж.}}$ такой покупки невелико.

Как видно из обоих рисунков, последний (пятый) покупатель собирается приобрести штучный товар, поэтому время его обслуживания невелико — 0,5 минут. Если этот покупатель придет в магазин № 1, он будет вынужден выстоять в очереди целых 8 минут, в то время как в магазине № 2 его обслуживают сразу же, вне очереди. Таким образом, среднее время обслуживания каждого из покупателей в магазине с дисциплиной обслуживания FIFO составит 4 минуты, а в магазине с дисциплиной обслуживания KB — лишь 2,8 минуты. А общественная польза, экономия времени составит: $(1 - 2.8/4) \times 100\% = 30$ процентов! В результате 30% сэкономленного для общества времени — и это лишь за счет правильного выбора дисциплины обслуживания.

Специалист по системам должен хорошо понимать ресурсы производительности и эффективности проектируемых им систем, скрытые в оптимизации параметров, структур и дисциплинах обслуживания. Моделирование помогает выявить эти скрытые резервы.

При анализе результатов моделирования важно также указать интересы и степень их выполнения. Различают интересы клиента и интересы владельца системы. Заметим, что эти интересы совпадают не всегда.

Судить о результатах работы СМО можно по показателям. Наиболее популярные из них:

- вероятность обслуживания клиента системой;
- пропускная способность системы;
- вероятность отказа клиенту в обслуживании;
- вероятность занятости каждого из канала и всех вместе;
- среднее время занятости каждого канала;
- вероятность занятости всех каналов;

- среднее количество занятых каналов;
- вероятность простоя каждого канала;
- вероятность простоя всей системы;
- среднее количество заявок, стоящих в очереди;
- среднее время ожидания заявки в очереди;
- среднее время обслуживания заявки;
- среднее время нахождения заявки в системе.

Судить о качестве полученной системы нужно по совокупности значений показателей. При анализе результатов моделирования (показателей) важно также обращать внимание на интересы клиента и интересы владельца системы, то есть минимизировать или максимизировать надо тот или иной показатель, а также на степень их выполнения. Чаще всего интересы клиента и владельца между собой не совпадают или совпадают не всегда. Показатели обозначим $H = \{h_1, h_2, \dots\}$.

Параметрами СМО могут быть: интенсивность потока заявок, интенсивность потока обслуживания, среднее время, в течение которого заявка готова ожидать обслуживания в очереди, количество каналов обслуживания, дисциплина обслуживания и так далее. Параметры влияют на показатели системы. Параметры обозначим как $R = \{r_1, r_2, \dots\}$.

3.8. Моделирование СМО в пространстве состояний

Рассмотрим следующую систему:

- Требования поступают в случайные моменты времени, при этом промежуток времени Q между любыми двумя последовательными требованиями имеет показательный закон с параметром m , т. е. функция распределения:

$$F_q(\tau) = 1 - e^{-m\tau}, \tau \geq 0. \quad (3.8.1)$$

- Система обслуживания состоит из s одинаковых, пронумерованных приборов.
- Время $t_{\text{обсл}}$ — случайная величина с равномерным законом распределения на отрезке $[a, b]$.

- Система без ожидания, то есть требование, заставшее все приборы занятыми, покидает систему.
- Дисциплина обслуживания такова: если в момент поступления k -го требования первый прибор свободен, то он приступает к обслуживанию требования; если этот прибор занят, а второй свободен, то требование обслуживается вторым прибором, и т. д.

Требуется оценить математические ожидания числа требований, обслуженных системой за время T и получивших отказ.

За начальный момент расчета выберем момент поступления первого требования $T_1 = 0$. Введем следующие обозначения: T_k — момент поступления k -го требования; t_i — момент окончания обслуживания требования i -м прибором, $i = 1, 2, 3, \dots, s$.

Предположим, что в момент T_1 все приборы свободны.

Первое требование поступает на прибор 1. Время обслуживания этим прибором имеет равномерное распределение на отрезке $[a, b]$. Поэтому конкретное значение $t_{\text{обсл}}$ этого времени находим по формуле: $t_{\text{обсл}} = a + r(b - a)$, где r — значение случайной величины R , равномерно распределенной на отрезке $[0, 1]$. Прибор 1 будет занят в течение времени $t_{\text{обсл}}$. Поэтому момент времени t_1 окончания обслуживания требования прибором 1 следует считать равным: $t_1 = T_1 + t_{\text{обсл}}$. Затем следует добавить единицу в счетчик обслуженных требований и перейти к рассмотрению следующего требования.

Предположим, что k требований уже рассмотрено. Определим момент $T_k + 1$ поступления $(k + 1)$ -го требования. Для этого найдем значение t промежутка времени между последовательными требованиями. Так как этот промежуток имеет показательный закон, то:

$$\tau = -\frac{1}{\mu} \ln r \quad (3.8.2)$$

где r — очередное значение случайной величины. Тогда момент поступления $(k + 1)$ -го требования: $T_k + 1 = T_k + t$.

Свободен ли в этот момент первый прибор? Для ответа на этот вопрос необходимо проверить условие $t_1 \leq T_k + 1$. Если это условие выполнено, то к моменту $T_k + 1$ первый прибор освободился и мо-

жет обслуживать требование. В этом случае t_1 заменяем на $(T_k + 1 + t_{\text{обсл}})$, добавляем единицу в счетчик обслуженных требований и переходим к следующему требованию. Если $t_1 > T_k + 1$, то первый прибор в момент $T_k + 1$ занят. В этом случае проверяем, свободен ли второй прибор. Если условие $t_2 \leq T_k + 1$ выполнено, заменяем t_2 на $(T_k + 1 + t_{\text{обсл}})$, добавляем единицу в счетчик обслуженных требований и переходим к следующему требованию. Если $t_2 > T_k + 1$, то проверяем условие $t_3 \leq T_k + 1$ и т. д. Если при всех i от 1 до s имеет $t_i > T_k + 1$, то в момент $T_k + 1$ все приборы заняты. В этом случае прибавляем единицу в счетчик отказов и переходим к рассмотрению следующего требования. Каждый раз, вычислив $T_k + 1$, надо проверить еще условие окончания реализации: $T_k + 1 \leq T$. Если это условие выполнено, то одна реализация процесса функционирования системы воспроизведена и испытание заканчивается. В счетчике обслуженных требований и в счетчике отказов находятся числа $n_{\text{обсл}}$ и $n_{\text{отк}}$.

Повторив такое испытание n раз (с использованием различных r) и усреднив результаты опытов, определим оценки математических ожиданий числа обслуженных требований и числа требований, получивших отказ:

$$Mn_{\text{обсл}} \approx \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (n_{\text{обсл}})_j \quad (3.8.3)$$

$$Mn_{\text{отк}} \approx \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (n_{\text{отк}})_j \quad (3.8.4)$$

где $(n_{\text{обсл}})_j$ и $(n_{\text{отк}})_j$ — значения величин $n_{\text{обсл}}$ и $n_{\text{отк}}$ в j -ом опыте.

Контрольные вопросы

1. Что называется статической и динамической моделями объекта?
2. Какие типовые схемы используются при моделировании сложных систем и их элементов?

3. Каковы условия и особенности использования при разработке моделей систем различных типовых схем?
4. В чем сущность метода статистического моделирования систем на ЭВМ?
5. Какие способы генерации последовательностей случайных чисел используются при моделировании на ЭВМ?
6. Какая последовательность случайных чисел используется в качестве базовой при статистическом моделировании на ЭВМ?
7. Дайте пояснение методу Монте-Карло.
8. Дайте характеристику моделям системы массового обслуживания.
9. Дайте характеристику СеМО.
10. Перечислите требования, предъявляемым к моделям СМО.

4. ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. АГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА

Имитационное моделирование — метод, позволяющий строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности. Такую модель можно «проиграть» во времени как для одного испытания, так и заданного их множества. При этом результаты будут определяться случайным характером процессов. По этим данным можно получить достаточно устойчивую статистику.

Имитационное моделирование — это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью с достаточной точностью описывающей реальную систему и с ней проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе. Экспериментирование с моделью называют имитацией (имитация — это постижение сути явления, не прибегая к экспериментам на реальном объекте).

Имитационное моделирование — это частный случай математического моделирования. Существует класс объектов, для которых по различным причинам не разработаны аналитические модели, либо не разработаны методы решения полученной модели. В этом случае математическая модель заменяется имитатором или имитационной моделью.

Имитационная модель — логико-математическое описание объекта, которое может быть использовано для экспериментирования на компьютере в целях проектирования, анализа и оценки функционирования объекта.

4.1. Принципы построения имитационных моделей активных систем

Процесс функционирования сложной системы можно рассматривать как смену ее состояний, описываемых ее фазовыми переменными $Z_{1(t)}, Z_{2(t)}, \dots, Z_{n(t)}$ в n — мерном пространстве.

Задачей имитационного моделирования является получение траектории движения рассматриваемой системы в n — мерном пространстве $(Z_1, Z_2, \dots Z_n)$, а также вычисление некоторых показателей, зависящих от выходных сигналов системы и характеризующих ее свойства.

В данном случае «движение» системы понимается в общем смысле — как любое изменение, происходящее в ней.

Известны два принципа построения модели процесса функционирования систем.

Принцип Δt . Рассмотрим этот принцип сначала для детерминированных систем. Предположим, что начальное состояние системы соответствует значениям $Z_1(t_0), Z_2(t_0), \dots Z_n(t_0)$. Принцип Δt предполагает преобразование модели системы к такому виду, чтобы значения $Z_1, Z_2, \dots Z_n$ в момент времени $t_1 = t_0 + \Delta t$ можно было вычислить через начальные значения, а в момент $t_2 = t_1 + \Delta t$ через значения на предшествующем шаге и так для каждого i -го шага ($\Delta t = \text{const}, I = 1 + M$).

Для систем, где случайность является определяющим фактором, принцип Δt заключается в следующем:

1. Определяется условное распределение вероятности на первом шаге ($t_1 = t_0 + \Delta t$) для случайного вектора, обозначим его $(Z_1, Z_2, \dots Z_n)$. Условие состоит в том, что начальное состояние системы соответствует точке траектории $(Z_{01}, Z_{02}, \dots X_{0n})$.

2. Вычисляются значения координат точки траектории движения системы ($t_1 = t_0 + \Delta t$), как значения координат случайного вектора, заданного распределением, найденным на предыдущем шаге.

3. Отыскиваются условное распределение вектора $(Z_{21}, Z_{22}, \dots Z_{2n})$ на втором шаге ($t_2 = t_1 + \Delta t$), при условии получения соответствующих значений $Z_{1i} (I = 1 + n)$ на первом шаге и т. д., пока $t_i = t_0 + i\Delta t$ не примет значения $(t_M = t_0 + M\Delta t)$.

Принцип Δt является универсальным, применим для широкого класса систем. Его недостатком является неэкономичность с точки зрения затрат машинного времени.

Принцип особых состояний (принцип δz). При рассмотрении некоторых видов систем можно выделить два вида состояний:

- обычное, в котором система находится большую часть времени, при этом $Z_i(t)$, ($i = 1 \div n$) изменяются плавно;
- особое, характерное для системы в некоторые моменты времени, причем состояние системы изменяется в эти моменты скачком.

Принцип особых состояний отличается от принципа Δt тем, что шаг по времени в этом случае не постоянен, является величиной случайной и вычисляется в соответствии с информацией о предыдущем особом состоянии.

Примерами систем, имеющих особые состояния, являются системы массового обслуживания. Особые состояния появляются в моменты поступления заявок, в моменты освобождения каналов и т. д.

Для таких систем применение принципа Δt является нерациональным, так как при этом возможны пропуски особых состояний и необходимы методы их обнаружения.

В практике использования имитационного моделирования описанные выше принципы при необходимости комбинируют.

Пример применения принципа Δt .

На рис. 4.1.1 приведена аналоговая схема дифференцирующего фильтра.

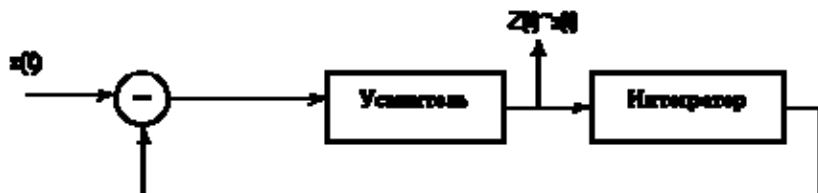


Рис. 4.1.1. Аналоговая схема дифференцирующего фильтра

Процесс, происходящий в фильтре, описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dZ}{dt} = K(x(t) - Z(t)) \quad (4.1.1)$$

В уравнении: K — коэффициент усиления, $x(t)$ — входной сигнал.

Доказано, что $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{dZ}{dt} \rightarrow \frac{dx}{dt}$

Преобразуем математическую модель фильтра (4.1.1) к виду, позволяющему применить принцип Δt . В простейшем случае достаточно уравнение (4.1.1) аппроксимировать конечно-разностным уравнением:

$$\frac{Z_{i+1} - Z_i}{\Delta t} = K(x_i - Z_i), \quad Z_i = Z(t_0 + i\Delta t), \quad x_i = x(t_0 + i\Delta t)$$

Что соответствует итерационной формуле: $Z_{i+1} = Z_i + K\Delta t(x_i - Z_i)$ (4.2)

Задав начальное условие $Z(t_0) = Z_0$ можно построить траекторию процесса, происходящего в фильтре, с целью получения текущего значения производной любой детерминированной функции $x(t)$, подаваемой на вход.

4.2. Понятие интеллектуального агента

В компьютерной науке, интеллектуальный агент — это программа, самостоятельно выполняющая задание, указанное пользователем компьютера, в течение длительных промежутков времени. Интеллектуальные агенты используются для содействия оператору или сбора информации. Одним из примеров заданий, выполняемых агентами, может служить задача постоянного поиска и сбора необходимой информации в Интернете. Компьютерные вирусы, боты, поисковые роботы — все это также можно отнести к интеллектуальным агентам. Хотя такие агенты имеют строгий алгоритм, «интеллектуальность» в этом контексте понимается как способность приспосабливаться и обучаться.

В искусственном интеллекте, под термином интеллектуальный агент понимаются разумные сущности, наблюдающие за окружающей средой и действующие в ней, при этом их поведение рационально в том смысле, что они способны к пониманию и их действия всегда направлены на достижение какой-либо цели. Такой агент может быть как роботом, так и встроенной программной системой. Об интеллектуальности агента можно говорить, если он

взаимодействует с окружающей средой примерно так же, как действовал бы человек.

Эти два значения понятия «интеллектуальный агент» достаточно различны, и между ними почти нет связи. Интеллектуальный агент в первом смысле может быть разработан, используя традиционные методы разработки, в нем немногим больше интеллекта, чем в почтовом клиенте или утилите для форматирования жесткого диска. Однако интеллектуальный агент во втором смысле может быть полностью независимым, выполняя свои задачи.

Динамика поведения большой активной системы в условиях неопределенности и конфликта в большинстве случаев непредсказуема и конечное ее состояние не может быть прогнозируемо из начального аналитически или путем логического анализа, так как оно является результатом многошагового взаимодействия активных элементов системы.

4.3. Мультиагентная имитация

Любая программа нужна для того, чтобы решать определенную задачу. Управление атомными реакторами и электрическими зубными щетками. Стимуляция работы сердца и системы электронного шпионажа. Денежные переводы и спекуляции на финансовых рынках. Трехмерное моделирование будущих реальных товаров и порождения больной фантазии дизайнеров компьютерных игр.

Представьте себе, что вам нужно решить глобальную задачу. В одиночку сделать этого вы ее не можете, т. к. ваши ресурсы одного человека весьма ограничены. В технических системах все обстоит точно так же. Сложные задачи не могут быть решены средней руки компьютером. Это всегда будет так, не зависимо от роста общего технологического уровня человечества. Если задачу может решить один среднестатистический человек или компьютер, то ее уже нельзя считать сложной. Так возникает мультиагентная система или многоагентная система (МАС, англ. Multi-agent system) — это система, образованная несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами.

Многоагентные системы могут быть использованы для решения таких проблем, которые сложно или невозможно решить с помощью одного агента или монолитной системы. Примерами таких задач являются онлайн-торговля, ликвидация чрезвычайных ситуаций, и моделирование социальных структур.

Многие МАС имеют компьютерные реализации, основанные на пошаговом имитационном моделировании. Компоненты МАС обычно взаимодействуют через и матрицу ответов. Модель «Запрос — Ответ — Соглашение» — обычное явление для МАС — схема реализуется за несколько шагов.

Для последнего шага обычно требуется еще несколько (более мелких) актов обмена информацией. При этом принимаются во внимание другие компоненты, в том числе уже достигнутые «соглашения» и ограничения среды.

МАС также относятся к самоорганизующимся системам, так как в них ищется оптимальное решение задачи без внешнего вмешательства. Под оптимальным решением понимается решение, на которое потрачено наименьшее количество энергии в условиях ограниченных ресурсов.

Главное достоинство МАС — это гибкость. Многоагентная система может быть дополнена и модифицирована без переписывания значительной части программы. Также эти системы обладают способностью к самовосстановлению и обладают устойчивостью к сбоям, благодаря достаточному запасу компонентов и самоорганизации.

Многоагентные системы применяются в нашей жизни в графических приложениях, например, в компьютерных играх. Агентные системы также были использованы в фильмах. Теория МАС используется в составных системах обороны. Также МАС применяются в транспорте, логистике, графике, геоинформационных системах и многих других. Многоагентные системы хорошо зарекомендовали себя в сфере сетевых и мобильных технологий, для обеспечения автоматического и динамического баланса нагрузки, расширяемости и способности к самовосстановлению.

4.4. Агентно-ориентированные технологии ситуационного моделирования больших систем

Агентно-ориентированные имитационные модели можно реализовать в различных системах и программных продуктах. Рассмотрим пример реализации агентных моделей в универсальной имитационной системе Simplex3, предоставляющей среду экспериментирования с обработкой результатов имитации и компонентно-ориентированный язык описания моделей Model Description Language (Simplex-MDL). Модель системы составляется из базисных MDL-компонентов, описывающих состояние и динамику поведения элементов системы, организационных компонентов, задающих структуру взаимосвязей между базисными компонентами, и мобильных компонентов — для описания сообщений, размещаемых в накопительных массивах и образующих очереди на обслуживание. Описания базисных компонентов включает разделы переменных состояния и динамики поведения агентов в виде алгебраических и дифференциальных уравнений, временных и условных событий, описывающих суть конфликта.

Рассмотрим агентные технологии моделирования на примере процедуры торга (переговорного процесса, где в качестве агентов выступают агенты-продавцы и агенты-покупатели). Продавцы и покупатели представлены в виде массивов базисных компонентов, соответственно, классов Seller и Buyer. Диалог между компонентами осуществляется через мобильный компонент Dialog, содержащий сообщения переговорного процесса, и базисный компонент Connect, направляющий сообщения Dialog конкретному получателю (продавцу или покупателю).

Поведение агента описывается как некоторая итерационная процедура переработки данных о состоянии агентов и мотиваций его действия. Каждой операции присущ свой алгоритмический и программный модуль:

1. Восприятие информации и накопление знаний в среде взаимодействия.
2. Связь с механизмом взаимодействия и обработки данных от противников-агентов.

3. Анализ собственного состояния и состояния противника-агента с выбором или корректировкой мотиваций в виде целевых функций.

4. Принятие локальных решений и выбор стратегий.

Состояние агента можно описать с интеллектуальных, эмоциональных, психофизиологических и функциональных позиций.

Формализация эмоционального состояния интеллектуального агента в многомерном эмоциональном пространстве и использование его в принятии решения.

Базисные компоненты объединяются в мультиагентную модель компонентом верхнего уровня Market в следующем MDL-описании:

```
HIGH LEVEL COMPONENT MarketSUBCOMPONENTSARRAY [16] Buyer, ARRAY [2] Seller, ConnectCOMPONENT CONNECTIONSBuyer{ALL j}. Buy --> Connect.Buys[j]; Seller{ALL i}. Sell --> Connect.Sells[i]; Connect.SellB{ALL j} --> Buyer[j]. Sell; Connect.BuyS{ALL i} --> Seller[i]. Buy; Seller{ALL i}. P --> Buyer{ALL}. P[i]; Seller{ALL i}. U --> Buyer{ALL}. U[i]; Seller{ALL i}. Z{ALL j} --> Buyer{ALL}. Z[i][j]; INITIALIZE-Buyer{j OF 1..16}. NumB := j; Seller{i OF 1..2}. NumS := i; END OF Market
```

При описании связей между компонентами в разделе COMPONENT CONNECTIONS в левой части указывается базисный компонент и экспортируемая переменная, а в правой — базисный компонент с сенсорной импортируемой переменной. Так, все элементы компонента Buyer передают из накопительного массива Buy сообщения в соответствующий массив Buys базисного компонента Connect: Buyer.Buy-->Connect. Buys, а компонент Seller — из своего накопительного массива Sell — мобильные компоненты соответствующему массиву Sells компонента Connect: Seller.Sell--> Connect. Sells и обратно. Наряду с этим базисный компонент Seller передает значение цены P, объем предложений U и значения факторов предложения ARRAY Z в базисный компонент Buyer.

События маркетингового периода составляют фазу транзакции с выбором покупателями продавца и совершением покупки и фазу

ценообразования с подведением итогов предыдущего периода и определением цены на следующий период. Мультиагентная модель конфликтной ситуации представляет воспроизведение переходного процесса движения к согласию и разрешению конфликта путем имитации тактического взаимодействия его участников в заданной среде.

Алгоритм переговорного процесса (процедуры торга) в транзактивной фазе включает цикл перебора конфликтующих элементов $j = 1, m$ с выбором переговорного партнера по критерию выбора или предпочтения и разыгрыванием согласия или отказа j -го агента с одной стороны от предложений i -го агента $i = 1, n$ с другой конфликтующей стороны. При взаимных уступках в переговорном процессе стороны все более склоняются к согласию так, что на каждом следующем шаге переговоров вероятность согласия увеличивается на определенную величину. При достижении согласия на том или ином этапе следует разрешение конфликта.

Моделирование поведения продавцов-конкурентов в фазе ценообразования связано со стратегиями эластичного ценообразования и в простейшем случае по завершению транзактивной фазы сводится к определению агентом-продавцом новой цены по формуле:

$$p_i^k = p_i^{k-1} + \frac{p_i^{k-1} - p_i^{k-2}}{v_i^{k-1} - v_i^{k-2}} (u_i^{k-1} - v_i^{k-1}), i = \overline{1, n} \quad (4.4.1)$$

где $p_i^k, p_i^{k-1}, p_i^{k-2}$ — текущая цена k -го периода имитации, и цены за $k-1$ -го и $k-2$ -го периода соответственно i -го продавца; v_i^{k-1}, v_i^{k-2} — спрос покупателей за $k-1$ -го и $k-2$ -го периода соответственно у i -го продавца; u_i^{k-1} — предложение i -го продавца за предыдущий период.

Другой моделью эластичного ценообразования является стратегия симплексного планирования эксперимента с поиском дрейфующего экстремума функции прибыли в условиях неопределенной конфликтной ситуации. Сравнивая значения функции отклика в различных точках факторного пространства, например, цена и предложение, агент оценивает предпочтительное направление желательного смещения рабочей точки к оптимуму. В общем случае

многомерное факторное пространство наряду с ценой и объемом предложений может включать все множество характеристик конкурентов и среды как, например, текущая доля рынка, объем продаж, доставка, реклама, качество и т. д. Стратегия каждого продавца сводится к решению на очередном шаге задачи оптимизации с выбором вектора изменения состояния в направлении экстремума целевой функции прибыли или доли рынка. При этом успех одного продавца — олигополиста и улучшение его целевой функции ведет к неудаче конкурента и его соответствующей реакции на следующем шаге. Таким образом, стратегии конкурирующих агентов строятся с учетом состояния друг друга и в результате многошаговой имитации их поведения приводят к воспроизведению некоторого стабилизированного состоянию рынка. Результаты моделирования, основанные на стратегии симплексного ценообразования для двух продавцов однородного продукта в среде Simplex3, позволяют представить в графической форме (подробное описание работы в имитационной системе Simplex3 представлены в методических указаниях [1]).

4.5. Моделирование событий

Любая работа (можно предположить) в системе совершается путем выполнения активностей. То есть активность является наименьшей единицей работы и ее рассматривают как единый дискретный шаг. Следовательно, активность является, единым динамическим объектом, указывающим на совершение единицы работ.

Процесс — это логически связанный набор активностей.

Пример: активность установки головки жесткого диска, активность передачи информации с жесткого диска.

Активности проявляются в результате свершения событий.

События — это мгновенное изменение состояния некоторого объекта системы. Рассмотренные объекты (активности, процессы, события) являются **конструктивными элементами** для динамического описания поведения системы. На их основе строятся языки моделирования системы. В то время, когда динамическое поведение системы формируется в результате выполнения большого

числа взаимодействующих процессов, сами эти процессы образуют относительно небольшое число классов. Чтобы описать поведение системы, достаточно описать поведение каждого класса процессов и задать значение атрибутов для конкретных процессов.

Задачи построения модели

Построение модели состоит из решения двух основных задач:

1. Первая задача сводится к тому, чтобы описать правила, описывающие виды процессов, происходящих в системе.

2. Вторая задача заключается в том, чтобы описать правила задания атрибутов или задать правила генерации этих значений. При этом система определяется на конкретном уровне детализации в терминах множества описаний процессов, каждый из которых в свою очередь включает множество правил и условий возбуждений активности. Такое описание системы может быть детализировано на более подробном или более иерархическом уровне представления с помощью декомпозиции процессов (в идеальном случае в активности). Это обеспечивает многоуровневое исследование системы.

Так как система в общем случае служит для описания временного поведения, то язык моделирования дискретных систем должен обладать средствами, отображающими время.

В реальной системе совместно выполняются несколько активностей, принадлежащим как связанным, так и не связанным процессам. Имитация их действий должна быть строго последовательной. Таким образом, модель системы можно рассматривать как модель описаний, активностей, событий или процессов. Отсюда и деление языков моделирования.

4.6. Базисные, мобильные и структурные компоненты имитационных моделей

Базисные, мобильные и структурные компоненты описываются на примере построения и реализации объектно-ориентированной мультиагентной модели логистической системы на примере мясоперерабатывающего предприятия АПК в универсальной имитационной системе *Simplex3*, и представляющей собой:

- банк моделей пользователя;
- среду экспериментирования с обработкой результатов имитации;
- компонентно-ориентированный язык описания моделей Simplex-MDL (Model Description Language) и язык описания эксперимента Simplex-EDL (Experiment Description Language).

Каждый агент описывается базисным MDL-компонентом с именем-идентификатором, декларированием переменных состояния и связей с другими компонентами и описанием динамики временного поведения агента с помощью алгебраических и дифференциальных уравнений или последовательности событий. Базисные компоненты объединяются в общую мультиагентную модель системы с помощью структурных компонентов, задающих структуру взаимосвязей между базисными компонентами, и мобильных компонентов — для описания сообщений или потоков между агентами.

Мультиагентная имитационная модель логистической системы мясоперерабатывающего предприятия АПК, представленная на рис. 4.6.1, включает *базисные компоненты* интеллектуальных агентов (ИА), описывающих:

- потоки поступления различных видов с/х животных от различных поставщиков (компонент SkotoBazi_High) и блочного мясного сырья (компонент Block);
- разветвляющиеся материальные потоки цеха убоя и первичной переработки с/х животных UboiRazd с двумя стратегиями: по заданным планам выпуска первичной продукции и по результатам структурной оптимизации материальных потоков по минимальному отклонению от заданной структуры ассортимента (процедура SferaRazb);
- процесс загрузки/выгрузки продукции в соответствующие камеры производственного холодильника (компонент KamHladZum, объединяющий базисные подкомпоненты, имитирующие работу камер охлаждения HladKam, замораживания ZumKam основной продукции (мяса) и замораживания сопутствующей продукции ZumKamSub;

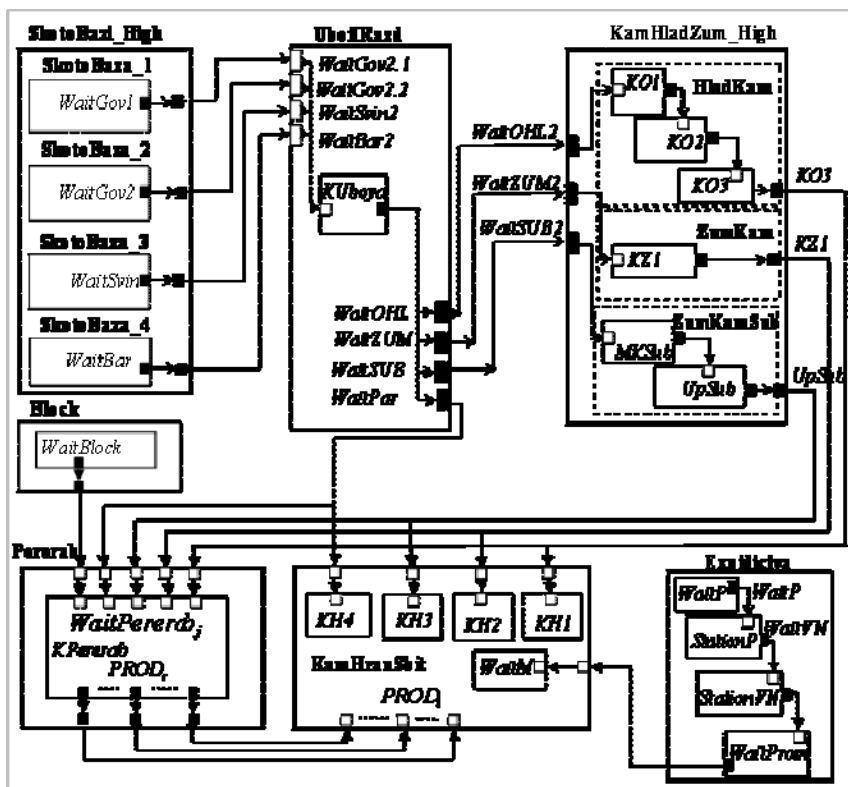


Рис.4.6.1. Мультиагентная имитационная модель логистической системы перерабатывающего предприятия АПК

- работу цехов переработки сырья с сетевой структурой материальных потоков (компонент *Pererab*) с двумя моделями поведения: выпуск готовой продукции по заданному плану и результатам структурного перераспределения материальных потоков с минимизацией отклонения от заданной структуры ассортимента (процедура *SferaSbora*);
- загрузку/выгрузку продукции в соответствующие камеры хранения и очереди *WaitM* на обслуживание автомобилей с заказами торговых организаций (компонент *KamHranSbit*,

имитирующий семь различных вариантов обслуживания заказов в зависимости от их количества, объемов и состава);

- поступление и обслуживание транспортных средств в очереди WaitM перед погрузочными рампами (базисный компонентExpidiciya).

Базисные MDL-компоненты объединяются в мультиагентную имитационную модель (рис. 4.6.1) с помощью *структурного компонента* Holod_High1, задающего структуру взаимосвязей между базисными компонентами описаниями вида SkotoBazi_High. WaitGov1-->UboiRazd. WaitGov2.1 и т. п., указывающими в данном случае, что очередь WaitGov1 из базисного компонента SkotoBazi_High передается в базисную компоненту UboiRazd в очередь WaitGov2.1.

HIGH LEVEL COMPONENT Holod_High1SUBCOMPONENTSS
kotoBazi_High, Block, UboiRazd, KamHladZum_High,
HranKamRampi,Expidiciya, PererabCOMPONENT CONNECTIONSSkoto
Bazi_High.WaitGov1--

>UboiRazd.WaitGov2.1;SkotoBazi_High.WaitGov2--

>UboiRazd.WaitGov2.2;.....UboiRazd.WaitPar-----

>HranKamRampi.KH4;KamHladZum_High.KO3--

>HranKamRampi.KH1;...KamHladZum_High.UpSub--

>HranKamRampi.KH3;Expidiciya.WaitProm--

>HranKamRampi.WaitM;END OF **Holod_High1**

Перемещающиеся и размещаемые в накопительных массивах (Location) в очередях на обслуживание материальные потоки описываются в мобильных компонентах в виде описания передвижных объектов.

4.7. Инструментальные средства и системы имитационного моделирования в объектно-ориентированных языках программирования в среде WINDOWS

Использование современных ЭВМ и вычислительных комплексов и сетей является мощным средством реализации имитационных моделей и исследования с их помощью характеристик процесса функционирования систем S. В ряде случаев в зависимости

от сложности объекта моделирования, т. е. системы **S**, рационально использование персональных ЭВМ (ПЭВМ) или локальных вычислительных сетей (ЛВС). В любом случае эффективность исследования системы **S** на программно-реализуемой модели прежде всего зависит от правильности схемы моделирующего алгоритма, совершенства программы и только косвенным образом зависит от технических характеристик ЭВМ, применяемой для моделирования. Большое значение при реализации модели на ЭВМ имеет вопрос правильного выбора языка моделирования.

Моделирование систем и языки программирования. 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, исследователь получает в распоряжение тщательно разработанную систему абстракций, предоставляющих ему основу для формализации процесса функционирования исследуемой системы **S**. 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 **M**.

Основными моментами, характеризующими качество языков моделирования, являются: удобство описания процесса функционирования системы **S**, удобство ввода исходных данных моделирования и варьирования структуры, алгоритмов и параметров модели, реализуемость статистического моделирования, эффективность анализа и вывода результатов моделирования, простота отладки и контроля работы моделирующей программы, доступность восприятия и использования языка. Будущее языков моделирования определяется прогрессом в области создания мультимедийных систем машинной имитации, а также проблемно-ориентированных на цели моделирования информационно-вычислительных систем.

Основные понятия, связанные с алгоритмическими языками и их реализацией на ЭВМ вообще и языками моделирования в частности:

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 элементарным машинным действиям (сложение, запоминание, пересылка по заданному 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, принимающая инструкции, написанные на алгоритмическом языке высокого уровня, и преобразующая 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 течение всего времени 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 или 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 языками.

Большинство языков интерпретаторов и компиляторов можно классифицировать как процедурно-ориентированные языки. Эти

языки качественно отличаются от машинно-ориентированных языков, описывающих элементарные действия ЭВМ и не обладающих проблемной ориентацией. Все процедурно-ориентированные языки предназначены для определенного класса задач, включают в себя инструкции, удобные для формулировки способов решения типичных задач этого класса. Соответствующие алгоритмы программируются в обозначениях, не связанных ни с какой ЭВМ.

Язык моделирования 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.

Особенности использования алгоритмических языков. Рассмотрим преимущества и недостатки использования для моделирования процесса функционирования систем языков имитационного моделирования (ЯИМ) и языков общего назначения (ЯОН), то есть универсальных и процедурно-ориентированных алгоритмических языков. Целесообразность использования ЯИМ вытекает из двух основных причин:

1) удобство программирования модели системы, играющее существенную роль при машинной реализации моделирующих алгоритмов;

2) концептуальная направленность языка на класс систем, необходимая на этапе построения модели системы и выборе общего направления исследований в планируемом машинном эксперименте. Практика моделирования систем показывает, что именно использование ЯИМ во многом определило успех имитации как метода экспериментального исследования сложных реальных объектов.

Языки моделирования позволяют описывать моделируемые системы в терминах, разработанных на базе основных понятий имитации. До того как эти понятия были четко определены и формализованы в ЯИМ, не существовало единых способов описания имитационных задач, а без них не было связи между различными разработками в области постановки имитационных экспериментов.

Высокоуровневые языки моделирования являются удобным средством общения заказчика и разработчика машинной модели Мм. Несмотря на перечисленные преимущества ЯИМ, в настоящее время выдвигаются основательные аргументы как технического, так и эксплуатационного характера против полного отказа при моделировании от универсальных и процедурно-ориентированных языков. Технические возражения против использования ЯИМ: вопросы эффективности рабочих программ, возможности их отладки и т. п.

В качестве эксплуатационных недостатков упоминается нехватка документации по существующим ЯИМ, сугубо индивидуальный характер соответствующих трансляторов, усложняющий их реализацию на различных ЭВМ, и трудности исправления ошибок. Снижение эффективности ЯИМ проявляется при моделировании задач более разнообразных, чем те, на которые рассчитан конкретный язык моделирования. Но здесь следует отметить, что в настоящее время не существует и ЯОН, который был бы эффективен при решении задач любого класса.

Серьезные недостатки ЯИМ проявляются в том, что в отличие от широко применяемых ЯОН, трансляторы с которых включены в поставляемое изготовителем математическое обеспечение всех современных ЭВМ, языки моделирования, за небольшим исключением, разрабатывались отдельными организациями для своих достаточно узко специализированных потребностей.

Соответствующие трансляторы плохо описаны и приспособлены для эксплуатации при решении задач моделирования систем, поэтому, несмотря на достоинства ЯИМ, приходится отказываться от их практического применения в ряде конкретных случаев.

При создании системы моделирования на базе любого языка необходимо решить вопрос о синхронизации процессов в модели, так как в каждый момент времени, протекающего в системе (системного времени), может потребоваться обработка нескольких событий, то есть требуется псевдопараллельная организация имитируемых процессов в машинной модели Мм. Это является основной задачей монитора моделирования, который выполняет следующие функции: управление процессами (согласование системного и ма-

шинного времени) и управление ресурсами (выбор и распределение в модели ограниченных средств моделирующей системы).

Классификация языков для программирования моделей систем имеет вид, приведенный в табл. 4.7.1.

Таблица 4.7.1

Классификация языков для программирования моделей систем

Аппаратно-программные средства			Типовые схемы	Ориентация языков	Язык
Моделирование систем	Аналоговые				
	Гибридные				
	Цифровые	Языки имитационного назначения	Непрерывные	На прямое использование дифференциальных уравнений	MIMIC
				На блочную имитацию дифференциальных уравнений	DYNAMO
			Комбинированные	На состояние и время	CAPS
			Дискретные	На действия	FORSIM
				На транзакты	GPSS
				На процессы	SIMULA
				На события	MIMSCRIPT
		Языки общего назначения		Многоцелевая	PL/1
				На расчеты	FORTRAN
				На обработку данных	COBOL

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются языки имитационного моделирования от языков общего назначения?
3. Какие основные требования предъявляются к языкам имитационного моделирования?

4. Какие имеются группы языков моделирования дискретных систем?
5. Какие особенности характеризуют имитационное моделирование систем?
6. Дайте обзор программным продуктам, реализующим агентное моделирование.
7. Что такое базисные, мобильные компоненты в универсальной имитационной системе Simplex3?
8. Дайте классификацию языков для программирования моделей систем.
9. Что такое структурные компоненты в универсальной имитационной системе Simplex3?
10. Что такое мультиагентная система?
11. Что такое интеллектуальный агент?
12. Что представляет собой алгоритмический язык?

5. ОБЗОР ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

5.1. Популярные системы имитационного моделирования

- MathWorks. MATLAB and Simulink for Technical Computing ИМИТАК
- Triad.Net
- AnyLogic
- Aimsun
- Arena
- PTV Vision VISSIM
- eM-Plant
- Powersim
- GPSS
- NS-2
- Transyt
- Tecnomatix Plant Simulation
- simuLab

5.2. Среда моделирования AnyLogic

AnyLogic — программное обеспечение для имитационного моделирования сложных систем и процессов, разработанное российской компанией «Экс Джей Текнолоджис» (англ. XJ Technologies). Программа обладает графической средой пользователя и позволяет использовать язык Java для разработки моделей.

Продукт получил название AnyLogic, потому что он поддерживал все три известных метода моделирования:

- системная динамика;
- дискретно-событийное (процессное) моделирование;
- агентное моделирование.

А также любую комбинацию этих подходов в пределах одной модели. Первой версии был присвоен индекс 4 — Anylogic 4.0, так как нумерация продолжила историю версий предыдущей разработки — COVERS 3.0.

Огромный шаг вперед был сделан в 2003 году, когда был выпущен AnyLogic 5, ориентированный на бизнес-моделирование. С помощью AnyLogic стало возможным разрабатывать модели в следующих областях:

- производство;
- логистика и цепочки поставок;
- рынок и конкуренция;
- бизнес-процессы и сфера обслуживания;
- здравоохранение и фармацевтика;
- управление активами и проектами;
- телекоммуникации и информационные системы;
- социальные и экологические системы;
- пешеходная динамика;
- оборона.

Версия программы AnyLogic 6.4.1, выпущенная 23 июля 2009 года написана на языке программирования Java в популярной среде разработки Eclipse. Anylogic 6 является кросс-платформенным программным обеспечением, работает как под управлением операционной системы Windows, так и под Mac OS и Linux.

AnyLogic & Java

AnyLogic включает в себя графический язык моделирования, а также позволяет пользователю расширять созданные модели с помощью языка Java. Интеграция компилятора Java в AnyLogic предоставляет более широкие возможности при создании моделей, а также создание Java апплетов, которые могут быть открыты любым браузером. Эти апплеты позволяют легко размещать модели AnyLogic на веб-сайтах. В дополнение к Java апплетам, AnyLogic Professional поддерживает создание Java приложений, в этом случае пользователь может запустить модель без инсталляции AnyLogic.

Методы имитационного моделирования

Модели AnyLogic могут быть основаны на любой из основных парадигм имитационного моделирования: дискретно-событийное моделирование, системная динамика, и агентное моделирование.

Системная динамика и дискретно-событийное (процессное) моделирование, под которым мы понимаем любое развитие идей GPSS — это традиционные устоявшиеся подходы, агентное моделирование — относительно новый.

Системная динамика оперирует в основном с непрерывными во времени процессами, тогда как дискретно-событийное и агентное моделирование — с дискретными.

Системная динамика и дискретно-событийное моделирование исторически преподаются совершенно разным группам студентов: менеджмент, инженеры по организации производства и инженеры-разработчики систем управления. В результате возникли три различных практически не пересекающихся сообщества, которые почти никак не общаются друг с другом.

Агентное моделирование до недавнего времени было строго академическим направлением. Однако, растущий спрос на глобальную оптимизацию со стороны бизнеса, заставил ведущих аналитиков обратить внимание именно на агентное моделирование и его объединение с традиционными подходами с целью получения более полной картины взаимодействия сложных процессов различной природы. Так родился спрос на программные платформы, позволяющие интегрировать различные подходы [23].

Теперь рассмотрим подходы имитационного моделирования на шкале уровня абстракции. Системная динамика, заменяя индивидуальные объекты их агрегатами, предполагает наивысший уровень абстракции. Дискретно-событийное моделирование работает в низком и среднем диапазоне. Что же касается агентного моделирования, то оно может применяться практически на любом уровне и в любых масштабах. Агенты могут представлять пешеходов, автомобили или роботов в физическом пространстве, клиента или продавца на среднем уровне, или же конкурирующие компании на высоком.

При разработке моделей в AnyLogic можно использовать концепции и средства из нескольких методов моделирования, например, в агентной модели использовать методы системной динамики для представления изменений состояния среды или в непрерывной модели динамической системы учесть дискретные события. Например, управление цепочками поставок при помощи имитационного моделирования требует описания участников цепи поставок агентами: производители, продавцы, потребители, сеть складов. При этом производство описывается в рамках дискретно-событийного (процессного) моделирования, где продукт или его части — это заявки, а автомобили, поезда, штабелеры — ресурсы. Сами поставки представляются дискретными событиями, но при этом спрос на товары может описываться непрерывной системно-динамической диаграммой. Возможность смешивать подходы позволяет описывать процессы реальной жизни, а не подгонять процесс под доступный математический аппарат.

Среда моделирования

Графическая среда моделирования AnyLogic включает в себя следующие элементы:

- **Stock & Flow Diagrams** (диаграмма потоков и накопителей) применяется при разработке моделей, используя метод системной динамики.
- **Statecharts** (карты состояний) в основном используется в агентных моделях для определения поведения агентов. Но также часто используется в дискретно-событийном моделировании, например для симуляции машинных сбоев.
- **Action charts** (блок-схемы) используется для построения алгоритмов. Применяется в дискретно-событийном моделировании (маршрутизация звонков) и агентном моделировании (для логики решений агента).
- **Process flowcharts** (процессные диаграммы) основная конструкция, используемая для определения процессов в дискретно-событийном моделировании.

В настоящее время вышла версия 6.8, которая имеет анимационные эффекты в 3D-графике, в новой версии — интеграция с SVN, новая версия «Пешеходной библиотеки», инструменты для продвинутого управления выполнением модели, новые полезные примеры моделей в любой предметной области, широкий спектр графического представления моделей и проведение оптимизационного эксперимента и многое другое.

На сайте компании можно просмотреть серию шаблонных моделей, провести видеотур, ознакомиться с презентациями конференций и методическими разработками компании, так и вузов, с которыми непосредственно сотрудничает компания. Также на сайте представлены видеоматериалы мастер-классов в области имитационного моделирования, проводимых в передовых вузах России.

Среда моделирования также включает в себя: низкоуровневые конструкции моделирования (переменные, уравнения, параметры, события и т. п.), формы представления (линии, квадраты, овалы и т. п.), элементы анализа (базы данных, гистограммы, графики), стандартные картинки и формы экспериментов.

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

Библиотеки AnyLogic

AnyLogic включает в себя набор следующих стандартных библиотек:

- **Enterprise Library** разработана для поддержки дискретно-событийного моделирования в таких областях, как Производство, Цепи поставок, Логистика и Здравоохранение. Используя Enterprise Library, Вы можете смоделировать системы реального мира с точки зрения заявок (англ. entity) (сделок, клиентов, продуктов, транспортных средств, и т. д.), процессов (последо-

вательности операций, очередей, задержек), и ресурсов. Процессы определены в форме блочной диаграммы.

- **Pedestrian Library** создана для моделирования пешеходных потоков в «физической» окружающей среде. Это позволяет вам создавать модели с большим количеством пешеходного трафика (как станции метро, проверки безопасности, улицы и т. д.).

Модели поддерживают учет статистики плотности движения в различных областях. Это гарантирует приемлемую работу пунктов обслуживания с ограничениями по загруженности, оценивает длину простаивания в определенных областях, и обнаруживает потенциальные проблемы с внутренней геометрией — такие как эффект добавления слишком большого числа препятствий — и другими явлениями.

В моделях, созданных с помощью **Pedestrian Library**, пешеходы двигаются непрерывно, реагируя на различные виды препятствий (стены, различные виды областей) так же как и обычные пешеходы. Пешеходы моделируются как взаимодействующие агенты со сложным поведением. Для быстрого описания потоков пешеходов **Pedestrian Library** обеспечивает высокоуровневый интерфейс в виде блочной диаграммы.

- **Rail Yard Library** поддерживает моделирование, имитацию и визуализацию операций сортировочной станции любой сложности и масштаба. Модели сортировочной станции могут использовать комбинированные методы моделирования (дискретно-событийное и агентное моделирование), связанные с действиями при транспортировке: погрузками и разгрузками, распределением ресурсов, обслуживанием, различными бизнес-процессами.

5.3. Универсальная имитационная система Simplex3

Универсальная система имитационного моделирования Simplex3, состоящая из открытого банка моделей для различных сфер приложения, среды экспериментирования, обеспечивающей построение моделей и управление экспериментом, обработку, анализ и пред-

ставление результатов, а также собственного специализированного объектно-ориентированного языка описания моделей Simplex MDL.

Разработан в 1993 году в Германии в университете Пассау под руководством профессора Бернда Шмидта. Simplex3 может быть применим во всех сферах, где решение частных дифференциальных уравнений не играет главной роли, а обыкновенных дифференциальных или разностных уравнения адекватно описывают рассматриваемую систему.

Система содержит многочисленные шаблоны, примеры моделей непрерывных и дискретных процессов массового обслуживания, производственных и транспортных систем, ситуационных моделей принятия решений.

Язык моделирования SIMPLEX MDL используется для компактного описания непрерывных и дискретных моделей, моделей очередей, ситуационных и транспортных моделей в виде базовых компонентов, их взаимосвязей и динамики, временных и условных событий, приоритетов и процедур.

5.4. Моделирование на GPSS

Язык GPSS (General Purpose Simulation System), ориентированный на процессы, разработан еще в 1961 году, но продолжает широко использоваться. Язык реализован в ряде программ имитационного моделирования, так, версия программы GPSS/PC в среде Windows создана в 2000 г.

Модель (программа) на языке GPSS представляет собой последовательность операторов (их называют блоками), отображающих события, происходящие в СМО при перемещениях транзактов. Поскольку в интерпретаторах GPSS реализуется событийный метод и в СМО может быть одновременно много транзактов, то интерпретатор будет попеременно исполнять разные фрагменты программы, имитируя продвижения транзактов в текущий момент времени до их задержки в некоторых устройствах или очередях.

Архитектура GPSS

Для описания имитационной модели на языке GPSS полезно представить ее в виде схемы, на которой отображаются элементы СМО — устройства, накопители, узлы и источники. Описание на языке GPSS есть совокупность операторов (блоков), характеризующих процессы обработки заявок. Имеются операторы и для отображения возникновения заявок, задержки их в ОА, занятия памяти, выхода из СМО, изменения параметров заявок (например, приоритетов), вывода на печать накопленной информации, характеризующей загрузку устройств, заполненность очередей и т. п.

Каждый транзакт, присутствующий в модели, может иметь до 12 параметров. Существуют операторы, с помощью которых можно изменять значения любых параметров транзактов, и операторы, характер исполнения которых зависит от значений того или иного параметра обслуживаемого транзакта.

Пути продвижения заявок между ОА отображаются последовательностью операторов в описании модели на языке GPSS специальными операторами передачи управления (перехода). Для моделирования используется событийный метод. Соблюдение правильной временной последовательности имитации событий в СМО обеспечивается интерпретатором GPSSPC — программной системой, реализующий алгоритмы имитационного моделирования.

Модель в GPSS строится из отдельных элементов, называемых объектами. Имеются всего четыре вида объектов:

- а) динамические, или транзакты;
- б) статические, или оборудование;
- в) статистические;
- г) операционные блоки.

Состояние модели в любой момент времени определяется совокупностью состояний всех объектов, составляющих модель; смена состояний модели предполагает изменение состояния хотя бы одного объекта. Основная особенность GPSS как системы моделирования состоит в том, что состояние модели изменяется лишь тогда, когда динамический объект — транзакт — проходит

через операционный блок. Именно транзакт, двигаясь по модели, является инициатором смены состояний оборудования, статистических объектов и других транзактов. Вместе с тем возникают вопросы: Что же такое транзакт? Какому элементу (или, быть может, подсистеме) реальной системы соответствует модельный объект транзакт?»

Однозначно ответить на эти вопросы нельзя, так как конкретный физический смысл в понятие «транзакт» вкладывает экспериментатор — разработчик модели. При помощи транзакта пользователь может моделировать, имитировать существование во времени таких динамических элементов реальных систем, как клиенты в магазинах, парикмахерских, столовых, автомашинах, судах, железнодорожных составах, в транспортных системах, задания (запросы) в ВС и т. д. Общим для всех этих различных по своей физической природе объектов материального мира является то, что время от времени они нуждаются в ресурсах системы, причем эти требования, заявки на ресурсы удовлетворяются весьма специфическим образом — в виде обслуживания динамических элементов статическими элементами исследуемой системы.

Например, в ВС ресурсом системы может быть время центрального процессора, память; в железнодорожной системе — время бригады пункта технического осмотра, время, на которое разрешается занимать составу путь на станции; в магазине — время продавца, кассира и т. д. Всякое обслуживание статическими элементами динамических по их требованию предполагает представления ресурса системы, ресурса статического элемента в распоряжение динамического элемента (быть может, в распоряжение нескольких динамических элементов одновременно), вообще говоря, на случайное, заранее не предсказуемое время. Если ресурс статического элемента полностью исчерпан, он становится недоступным для других динамических элементов, и именно тогда возникают очереди.

Динамический объект GPSS — транзакт — во многом аналогичен динамическому объекту систем массового обслуживания (СМО) — запросу; вместе с тем это понятие более широкое и сложное.

Статические объекты GPSS-оборудование. К оборудованию относятся:

а) приборы (устройства, FACILITY), аналогичные одноканальным СМО с очередью;

б) накопители (STORAGE), сопоставимые как с реальными накопителями, так и с многоканальными СМО. Реальным накопителем может быть запоминающее устройство ВС, путевое устройство железнодорожной станции, стоянка автомобилей с ограниченным числом мест и т. д.;

в) логические переключатели (SWITCH), сопоставимые со светофорами с двумя состояниями — красным и зеленым сигналами.

Статистических объектов в GPSS два вида: очереди (QUEUE) и таблицы (TABLE). Очереди, несмотря на их название, никоим образом не влияют на организацию очередей в модели — они служат только для сбора статистики в виде средних значений временных интервалов, в течение которых транзакты проходят путь между двумя точками в модели, а также числа транзактов между этими точками.

Таблицы используются для сбора статистической информации в виде эмпирических функций распределения случайных величин, получаемых в ходе моделирования.

Операционные блоки, как уже отмечалось, служат для изменения состояния оборудования, статистических объектов и транзактов. Кроме того, они создают и уничтожают транзакты, определяют направление движения транзактов в модели, задерживают транзакты на случайное или детерминированное время.

5.5. Simula

В 1966 году была описана первая версия Simula, впоследствии ставшая известной как Simula 1. Язык Simula, известный как Simula 67, впервые описан в 1970. Общим предком практически всех используемых сегодня объектных и объектно-ориентированных языков является язык Simula. Язык Simula основывался на идеях ALGOL (название семейства императивных языков про-

граммирования, применяемых при составлении программ для решения научно-технических задач на ЭВМ.), но был дополнен механизмом наследования и инкапсуляции. Но еще более существенно то, что Simula, предназначен для описания систем и моделирования, ввел дисциплину написания программ, отражающих словарь предметной области.

5.6. ARIS Simulation — модуль динамического имитационного моделирования

Модуль ARIS Simulation предоставляет данные, которые могут быть получены только благодаря моделированию процессов во времени, такие данные нельзя извлечь из статической модели. Только исследование совместного влияния различных факторов на некотором временном отрезке может выявить узкие места, например, критические ситуации, возникающие в связи с нехваткой ресурсов, или низкий процент загрузки ресурсов. В результате динамического анализа деловых процессов могут быть выявлены длительности периодов простоя в процессах, например, динамика времени ожидания и ситуации недостатка ресурсов.

Имитация позволяет обнаружить возникновение незапланированного времени ожидания в некоторых точках процесса и, таким образом, позволяет выявить недостаток людских ресурсов. В таком случае, функция процесса не может быть выполнена из-за того, что все назначенные сотрудники заняты выполнением других функций. Используется:

- для оценки возможностей оптимизации/модификации процессов (например, по финансовым или временным затратам);
- для выявления узких мест;
- для выявления на ранних стадиях и оценки критических ситуаций, связанных с нехваткой ресурсов;
- для оценки потенциальных возможностей модификации моделей в реальных ситуациях;
- для оценки различных сценариев в количественных характеристиках;
- для оперативной оптимизации деловых процессов.

5.7. Adams

Adams — широко используемое программное средство для виртуального моделирования сложных машин и механизмов.

MSC.Adams заменяет дорогостоящие и длительные натурные эксперименты быстрым и подробным компьютерным моделированием, обеспечивая предприятиям экономию значительных средств и выход на рынок с всесторонне оптимизированными изделиями. С помощью MSC.Adams быстро создается полностью параметризованная модель изделия: она строится непосредственно в препроцессоре или импортируется из наиболее популярных CAD-систем. Задав связи компонентов модели, приложив нагрузки, определив параметры кинематического воздействия и запустив расчет, можно получить данные, полностью идентичные результатам натурных испытаний системы.

Таким образом, представление о работе изделия складывается еще до начала раскроя металла или отливки пластика для изготовления опытного образца.

С использованием MSC.Adams сведения о характеристиках работы будущего изделия, получение которых требовало длительного времени и огромных затрат, могут быть получены в течение нескольких часов.

Видеть, как будет работать машина, улучшать ее характеристики пользователь может уже на самых ранних этапах проектирования.

Пользователю доступны:

- выявление параметров изделия, определяющих его работоспособность и точность;
- проверка компонентов машины на столкновения, определение габаритных размеров пространства, необходимого для ее движущихся частей;
- определение уровня действующих нагрузок и необходимой мощности приводов;
- оптимизация параметров изделия.

MSC.Adams позволяет исследовать десятки, сотни и даже тысячи вариантов конструкции, выбирать лучшие, совершенствовать и совершенствовать будущее изделие, затрачивая на это во много раз меньше времени и средств, чем при традиционном подходе.

MSC.Adams может использоваться для улучшения конструкций всего, что движется: от простых механических и электромеханических устройств до автомобилей и самолетов, железнодорожной техники и космических аппаратов.

MSC.Adams отличаются:

- широкий набор видов кинематических связей, упругих и диссипативных звеньев, нагрузок, кинематических воздействий;
- совместимость с системой моделирования систем автоматического регулирования и управления matlab/simulink, а также пользовательскими программами, что обеспечивает моделирование и исследование сложных гетерогенных динамических систем;
- легкость в изучении и использовании — моделирование соответствует основным шагам построения физического макета (построение виртуальных прототипов, выполнение набора тестов, совершенствование конструкции);
- знакомый интуитивный интерфейс — если вы знакомы с другими программными средствами, то быстро освоите работу с MSC.Adams;
- полная параметризация виртуальных моделей — любые параметры прототипа могут быть связаны функциональной зависимостью, модификация какого-либо размера модели автоматически приводит к изменению ее конфигурации и т. п.;
- эффективные средства визуализации результатов моделирования, включая анимацию и построение графиков.

Наряду с развитием универсальных возможностей пакета, разработчиками MSC.Adams созданы проблемно-ориентированные модули, обеспечивающие точное и быстрое моделирование самых сложных объектов:

- автомобилей (adams/car, adams/engine и др.);
- самолетов (adams/aircraft);
- железнодорожного транспорта (adams/rail);

- устройств автоматического управления (adams/control; adams/hydraulics).

В программном пакете MSC.Adams предусмотрена возможность учета податливости компонентов исследуемой машины. Для этого упругие характеристики ее частей определяются в конечно-элементной системе, а затем в специальном формате передаются в MSC.Adams и включаются в виртуальную модель. Усилия, действующие в механизме и определенные с учетом податливостей, могут затем быть переданы в конечно-элементную систему и использованы как исходные данные для определения уровней напряжений в деталях. Такая технология обеспечивает суперточное моделирование современных оптимизированных по массе высокодинамичных механизмов.

Основой MSC.Adams являются системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику исследуемого объекта. Разработчики MSC.Adams продолжают повышать эффективность математической базы программного пакета. Применение устойчивых методов «жестких» систем дифференциальных уравнений обеспечивает получение необходимых результатов с минимальными затратами времени, компьютерных ресурсов и с большой надежностью.

MSC.Adams работает как на рабочих станциях, так и на персональных компьютерах.

5.8. Пакет визуального моделирования Simulink

Одной из самых сложных проблем в реализации математического моделирования в среде MATLAB является подготовка модели моделируемой системы или устройства. Модель обычно представляется в форме графического, табличного или таблично-топологического описания. При этом необходимо предусмотреть организацию связей между компонентами и установку их параметров. После этого нужно запустить модель на исполнение, то есть задать решение автоматически составленной системы уравнений состояния и вывод результатов решения, что зачастую представляет собой достаточно сложную задачу.

Все вышеупомянутые проблемы эффективно решаются при помощи расширения Simulink — важной составной части системы MATLAB. Это расширение реализует визуально-ориентированное программирование задач автоматического составления графической модели системы или устройства, составления и решения уравнений состояния и наглядного представления результатов моделирования. Пакет Simulink позволяет выполнять симуляцию работы моделируемых систем и устройств, то есть осуществлять имитационное моделирование.

Новые версии Simulink интенсивно развиваются в направлении развития техники моделирования систем и устройств, структура которых может изменяться под воздействием ситуаций, которые характерны для работы устройств в те или иные моменты времени. Другими словами, развивается направление ситуационного моделирования. Специальное расширение StateFlow BlockSet обеспечивает расширенные возможности ситуационного моделирования — в частности позволяет в динамике отслеживать связи между блоками моделей и строить наглядные SF-диаграммы [6].

Пакет Simulink является ядром интерактивного программного комплекса, предназначенного для математического моделирования линейных и нелинейных динамических систем и устройств, представленных своей функциональной блок-схемой, именуемой S-моделью или просто моделью. При этом возможны различные варианты моделирования: во временной области, в частотной области, с событийным управлением, на основе спектральных преобразований, с использованием метода Монте-Карло (реакция на воздействия случайного характера) и т. п.

Simulink автоматизирует следующий, наиболее трудоемкий этап моделирования: он составляет и решает сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную функциональную схему (модель), обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль за поведением созданного пользователем виртуального устройства — достаточно уточнить (если нужно) вид анализа и запустить Simulink в режиме симуляции созданной модели системы или устройства.

Ценность пакета Simulink заключается и в обширной, открытой для изучения и модификации библиотеке компонентов (блоков). Она включает источники сигналов с практически любыми временными зависимостями, масштабирующие, линейные и нелинейные преобразователи с разнообразными формами передаточных характеристик, квантующее устройство, интегрирующие и дифференцирующие блоки и т. д. Кроме этого пакет Simulink включает в себя отдельные специализированные библиотеки, наиболее полезными из которых являются: пакет для моделирования систем передачи дискретных сообщений (Communications Blockset) и пакет для моделирования систем цифровой обработки сигналов (DSP Blockset).

Средства графической анимации Simulink позволяют строить виртуальные физические лаборатории с наглядным представлением результатов моделирования. Возможности Simulink охватывают задачи математического моделирования сложных динамических систем в физике, электро- и радиотехнике, биологии и других областях науки и техники. Этим объясняется популярность данного пакета как в вузах, так и в научных лабораториях.

Важным достоинством пакета Simulink является возможность задания в блоках произвольных математических выражений, что позволяет решать типовые задачи, пользуясь примерами пакета Simulink или же просто задавая новые выражения, описывающие работу моделируемых пользователем систем и устройств. Важным свойством пакета является возможность задания системных функций (S-функций) с включением их в состав библиотек Simulink. Необходимо также отметить возможность моделирования устройств и систем в реальном масштабе времени.

Как программное средство Simulink — типичный представитель визуально-ориентированных языков программирования. На всех этапах работы, особенно при подготовке моделей систем, пользователь практически не имеет дела с обычным программированием. Программа в кодах автоматически генерируется в процессе ввода выбранных блоков компонентов, их соединений и задания параметров компонентов.

5.9. PowerSim Studio

PowerSim Studio была создана в 2005 году и распространяется норвежской фирмой PowerSim Software AS. Используемая методология построена на базе классических методов системной динамики, созданных Дж. Форрестером. Пакет является приложением SAP SEM BPS, но может использоваться как автономное приложение. Пакет имеет развитые средства визуального программирования и различные расширенные возможности, в том числе встроенные блоки анализа рисков и оптимизации. Модели, созданные с помощью PowerSim могут быть легко интегрированы в различные информационные системы предприятий.

5.10. StarLogo

StarLogo — мультиагентная версия языка программирования Лого, созданная в середине 1990-х годов группой разработчиков из MIT Media под руководством Михеля Решника и Эрика Клопфера. Система распространяется на бесплатной основе.

5.11. NetLogo

NetLogo представляет собой многоагентную программную моделирующую среду и благодаря тому, что она распространяется на бесплатной основе, используется тысячами студентов, преподавателями и исследователями во всем мире. Система создана Ури Виленским в 1999 году и развивается в Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling.

5.12. Пакеты прикладных программ моделирования

Пакеты прикладных программ (ППП) — это специальным образом организованные программные комплексы, рассчитанные на общее применение в определенной проблемной области и дополненные соответствующей технической документацией.

В зависимости от характера решаемых задач различают следующие разновидности ППП:

- 1) пакеты для решения типовых инженерных, планово-экономических, общенаучных задач;
- 2) пакеты системных программ;
- 3) пакеты для обеспечения систем автоматизированного проектирования и систем автоматизации научных исследований;
- 4) пакеты педагогических программных средств и другие.

5.13. Arena

Система имитационного моделирования Arena предоставляет технологии, необходимые для поддержки всех аспектов процесса моделирования. Позволяет:

- моделировать процессы для последующего исследования, документирования, коммуникаций;
- моделировать бизнес «as to be», отразить все протекающие процессы, определить возможности усовершенствования;
- визуализировать процессы с помощью динамической графики и мультипликации;
- анализировать эффективность системы «как есть» и сравнивать большое число альтернатив «как должно быть» для выбора наилучшей.

В число средств, позволивших Arena стать мировым лидером в области систем моделирования, входят такие, как методика моделирования в виде блок-схем, иерархическое моделирование и обширная графическая библиотека. В совокупности с такими встроенными инструментальными средствами как Arena Viewer, Input Analyzer, Output Analyzer, OptQuest, система Arena представляет собой удобный гибкий пакет — среду работы системного аналитика. Она позволяет моделировать производственные процессы, системы массового обслуживания, социально-экономические процессы и многое другое.

Контрольные вопросы

1. Как можно представить архитектуру языка имитационного моделирования GPSS?

2. Возможности универсальной имитационной системы Simplex3.
3. Какие подходы реализует имитационная система Anylogic?
4. Какие подходы моделирования можно реализовать в универсальной системе Simplex3?
5. Современные пакеты прикладных программ.
6. Какие модели можно реализовать в системе PowerSim Studio?
7. Предназначение пакета визуального моделирования Simulink.
8. Предназначение программного продукта Adams.
9. Возможности программного продукта Simula.
10. Какие модели можно реализовать в среде ARIS — Simulation?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Примеры моделей (Предметная область — Здравоохранение)

Формирование комплекса моделей для принятия решений в сфере здравоохранения (на примере преодоления распространения вирусной инфекции ОРВИ)

Введение. Создание комплекса моделей в сфере здравоохранения, медицинского обслуживания, а именно распространения инфекционных заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем. В частности, учитываются сезонные вспышки ОРВИ (в т. ч. гриппа). ОРВИ вызывается разнообразными возбудителями, среди которых не менее 5 различных групп вирусов и более 300 их подтипов, все они весьма контагиозны (заразны), так как передаются воздушно-капельным путем. Вирусы ОРВИ эффективно распространяются и при телесном контакте. В среднем организм вырабатывает антитела на 5-й день протекания болезни. При этом повторное заболевание данным штаммом вируса становится невозможным. ОРВИ является самым распространенным инфекционным заболеванием в развитых странах, в среднем за год взрослый человек болеет ОРВИ не реже 2–3 раз, ребенок — 6–10 раз в год, поэтому прогнозирование и мониторинг заболеваемости среди групп населения данным типом болезни крайне важны для проведения правильной политики здравоохранения, а также для анализа уровня жизни и демографических показателей.

Концептуальное моделирование. Моделирование распространения вирусной инфекции одна из серьезных проблем, целью которого является прогнозирование этого процесса на краткосрочной перспективе (сезон); следует проанализировать процесс распространения вирусной инфекции в зависимости от следующих факторов: эффективности мер закрытия школ, детских садов; использование лекарственных средств, позволяющих снизить среднюю продолжительность протекания заболевания; использование защитных масок; использование личного транспорта вместо общественного; начальной численности заболевших и общей численности

населения; численности медицинского персонала, а также числа врачебных амбулаторно-профилактических учреждений.

Использование агентных технологий и систем массового обслуживания имитационного моделирования для программной реализации моделей дают возможность разработать рекомендации о путях преодоления эпидемий респираторных вирусных заболеваний на основе анализа полученных результатов.

Рассматривая распространение вирусной инфекции как систему, можно выделить такие элементы, как люди и локации. Люди являются прямыми субъектами моделирования, способными перемещаться, болеть, вырабатывать иммунитет и заражать других. Локации — места скопления людей, которые возникают в соответствии с их жизнедеятельностью. Характеристики объектов приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Группы населения людей		
По возрасту	По состоянию здоровья	По месту пребывания
0–7 лет	Здоров	В детском саду, яслях
7–16 лет	В контакте с вирусом	В школе
16–21 год	Инфицирован	В университете
более 22 лет	Болен с симптомами	На работе
	Переболел	Дома
		В общественном транспорте

Таблица 2

Локации — места распространения вирусной инфекции

Локация	По степени контакта людей между собой
Дом	Низкая
Детский сад, ясли	Средняя
Школа	Высокая
Университет	
Работа	
Общественный транспорт	

Каждому возрасту соответствует определенный уровень восприимчивости к болезни. Свойство восприимчивости смоделировано путем вероятностных коэффициентов, полученных на основе статистики заболеваемости ОРВИ по возрастным группам за 2010 год. Каждый человек может посещать одну или несколько локаций, где он так или иначе контактирует с другими агентами, которые могут быть как инфицированы, так и не инфицированы, и в случае длительного и тесного контакта с заданной вероятностью объект может заразиться, если не обладает выработанным иммунитетом. После этого время болезни моделируется согласно средней продолжительности протекания заболевания ОРВИ, распределенного по нормальному закону. При этом агент может прекратить посещать локации (кроме дома) на время своей болезни, что имитирует лечение в медицинских учреждениях, при этом он может прекратить посещать работу не сразу во время начала болезни, то есть с задержкой в несколько дней. Такой период моделируется согласно нормальному распределению по данным о закрытии больничных листов по вирусным инфекционным болезням. Каждый агент привязывается к одной или нескольким локациям посредством вероятностного распределения, основанного на статистике по возрастным группам по социальным статусам (роду деятельности: школьник, рабочий, студент и т. д.). Тем самым моделируются условия реальной жизни каждого человека и всей системы (например, города) в целом и условия возможности передачи вирусной инфекции.

Таблица 3

Вероятности заболевания по возрастным группам

Возрастная группа, лет	Вероятность заболевания, %
0–7	90
7–16	85
16–21	80
более 21	75

Таблица 4

Заболеваемость в зависимости от времени года

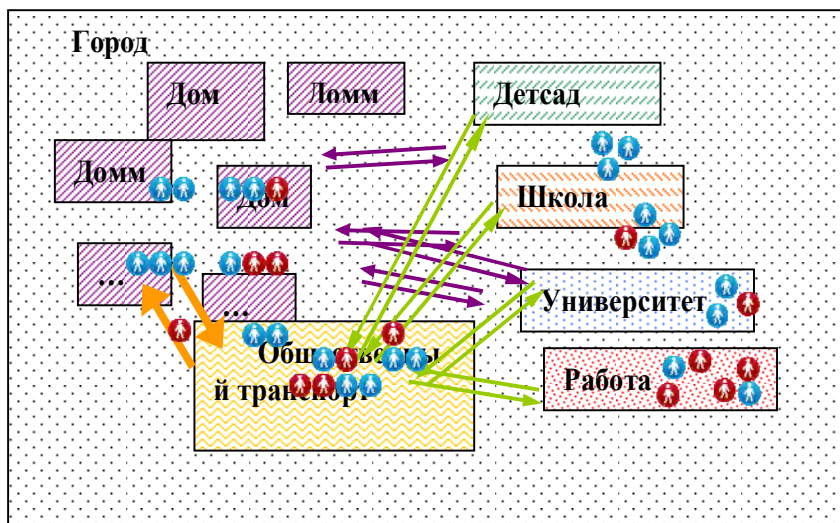
Время года	Доля переболевших ОРВИ, %
Весна	7,15
Лето	3,48
Осень	11,72
Зима	24,79

Таблица 5

Продолжительность заболевания

Состояние	Продолжительность, дни		
	Мин.	Макс.	Средняя
Инкубационный период	0,25	1	0,5
Заразный инкубационный период	1	7	3
Выздоровление (избавление от симптомов)	5	14	10

Концептуальная модель распространения вирусной инфекции по локациям



Программная реализация модели в имитационной среде AnyLogic 6

Продукт AnyLogic 6 позволяет реализовывать имитационные модели в удобной и наглядной форме пользователю, благодаря широким возможностям создания графического представления. Симуляция начинается с экранного окна, в котором пользователь может ознакомиться с параметрами модели, установить численные исходные данные: начальное число инфицированных для каждой группы населения, доли привитых жителей, доли использования личного транспорта, использования защитных масок, уровня численности медицинского персонала и количества врачебных АПУ, выбирается сезон в виде времени года.



Рис. 1. Экранная форма ввода параметров модели распространения вирусной инфекции ОРВИ

После нажатия кнопки «Запуск» пользователь переходит в окно симуляции, где начинается проигрываться моделируемая ситуация. На экранной форме отображаются локации, разделенные на секторы (квартиры, офисы, группы) и возможность мониторинга уровня заболеваемости по каждой из ее стадий для каждой группы населения в виде временных графиков и столбчатых диаграмм.

Во время проигрывания модели можно изменять такие параметры, как использование защитных масок, численность медицинского персонала и число врачебных АПУ. Также модель позволяет в режиме реального времени осуществлять закрытие на карантин школ и детских садов.

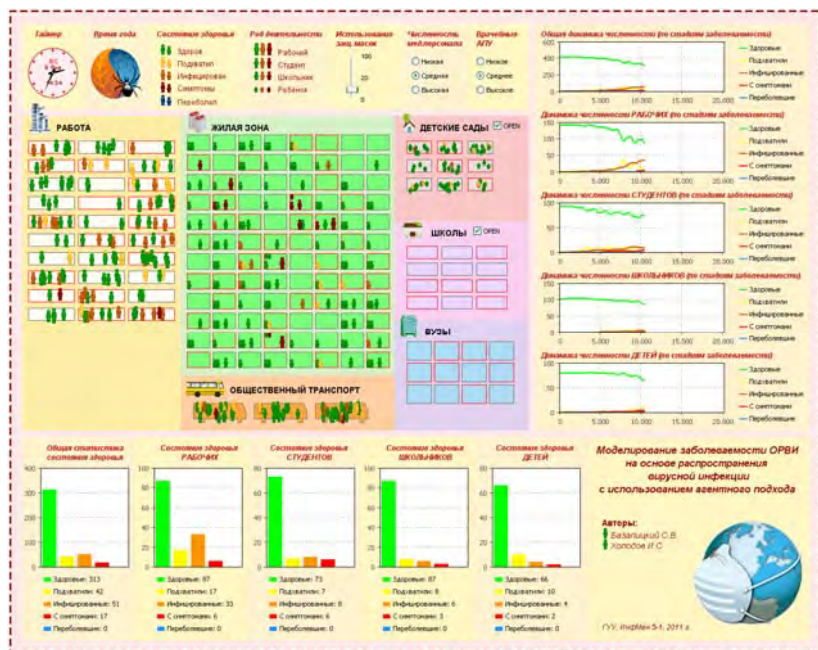


Рис.2. Экранная форма ввода параметров моделирования

В разработанной модели реализовано шесть локаций, представляющих собой классы активного объекта. Локации содержат в себе следующие элементы (см. табл. 6 и рис. 3–8).

Таблица 6

Описание объектов моделирования

Объект	Описание
Переменные X, Y	Подразумевают координаты локации, позволяют агентам перемещаться между локациями на визуальном уровне
Коллекции	Объекты, позволяющие объединить агенты в группы, чтобы те могли взаимодействовать друг с другом
Переменная infected	Переменная-флаг. Если в данной локации кто-либо инфицирован, локация выделяется красным контуром

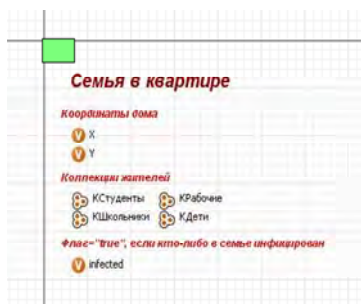


Рис. 3. Группы людей «Семья в квартире»

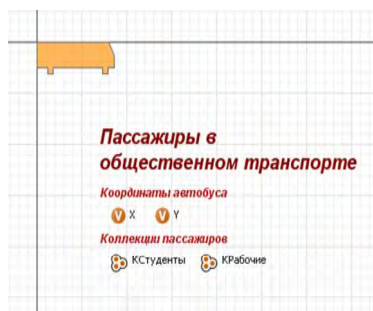


Рис. 4. Группы людей «Пассажиры в общественном транспорте»



Рис. 5. Группы населения «Работа»



Рис. 6. Группы населения дети «Дети в детских садах»

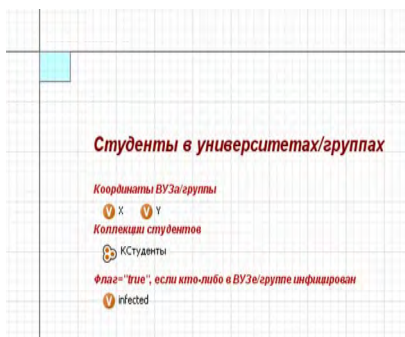


Рис. 7. Группы населения «студенты»
локация «Университет»

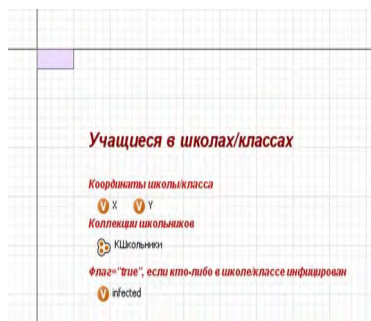


Рис. 8. Группы населения ученики
локация «Школа»

При разработке модели используются агентные технологии имитации. В качестве агентов выступают группы населения: рабочий, студент, школьник и ребенок дошкольного возраста. Состояние агентов описываются двумя диаграммами, нижеперечисленными параметрами переменных и событий.

Таблица 7

Описание объектов

Объект	Описание
1	2
Параметр Контактов_в_день	Хранит интенсивность контактов с другими агентами
Параметр Вероятность_инфицирования	Хранит значение вероятности заболеть после контакта с инфицированным
Параметр Пользование_Транспортом	Вероятность того, что агент имеет личный транспорт
Переменная Прививка	Вероятность того, что агент привит
Переменная Маска	Вероятность того, что агент пользуется защитной маской
Переменная Сезон	Время года, выраженное в коэффициенте — факторе заболеваемости
Переменные ДомX и ДомY	Подразумевают координаты агента в его квартире (локация «Дом»)
Переменные ДомL, ТранспортL и др.	Необходимы для обращения к другим локациям и перемещения

1	2
События hour	События смены локации, соответствующие общепринятому режиму дня
Событие reflash	Пересчитывает параметр Вероятности инфицирования при изменении влияющих на него параметров-факторов

Таблица 8

Диаграмма состояний «Стадии заболеваемости»

Состояние	Описание
Здоровый	Здоровый человек, не вступавший в контакт с инфекцией
Подхватил	Человек, вступивший в контакт с инфекцией
Иммунен	Человек, который благодаря своему иммунитету не заболел
Инфицированный	Заболевший без проявления симптомов. Заражает других
Симптомы	Заболевший с проявлением симптомов. Заражает других, перестает перемещаться по локациям
Переболевший	Человек, который вылечился. Ведет себя как здоровый, но не способен вновь заболеть

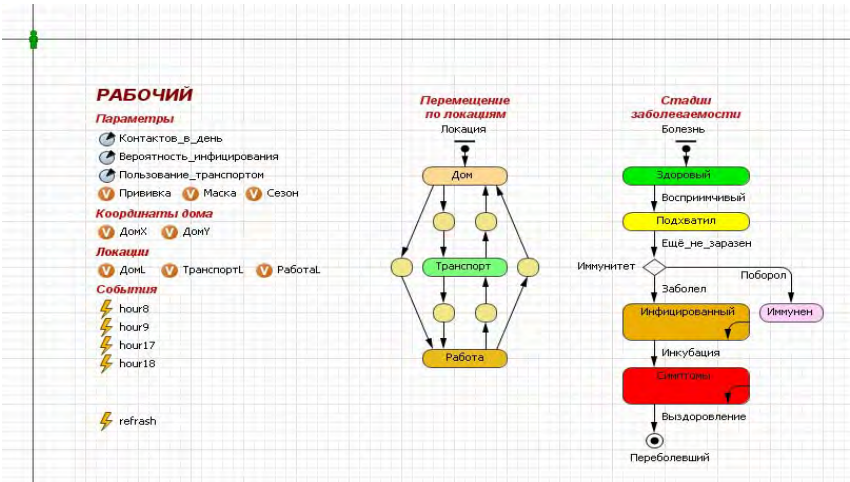


Рис. 9. Диаграмма состояния агента «Рабочий»

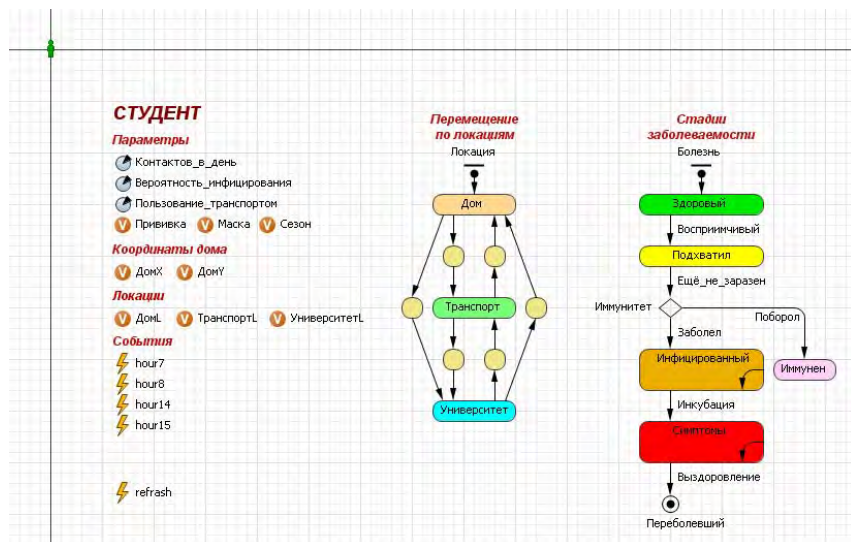


Рис. 10. Диаграмма состояний агент «Студент»

Моделирование СМО в имитационной системе Simplex3

Одним из факторов повышения распространения ОРВИ может быть очередь в поликлинике, особенно в зимнее время и в начале весеннего периода. Для разработки модели очереди приема к врачу была использована среда имитационного моделирования Simplex3. Продолжительность симуляции составляет 480 минут (8 часов, рабочий день). Рассмотрим три ситуации: обслуживание в сезон низкой заболеваемости ОРВИ, обслуживание в сезон повышенной заболеваемости ОРВИ и обслуживание во время вспышки ОРВИ. Интенсивность прихода пациентов равняется 13 минутам, интенсивность оказания медицинских услуг составляет 10 минут. Анализируя графические зависимости, можно сделать вывод, что при данной ситуации сильной загрузки не происходит и в результате всем пациентам будут оказаны медицинские услуги. Тем не менее, существует экстремум очереди в точке со значением 8 человек, следовательно, площадь перед кабинетом врача должна быть оснащена не менее, чем восьмью сидячими местами.

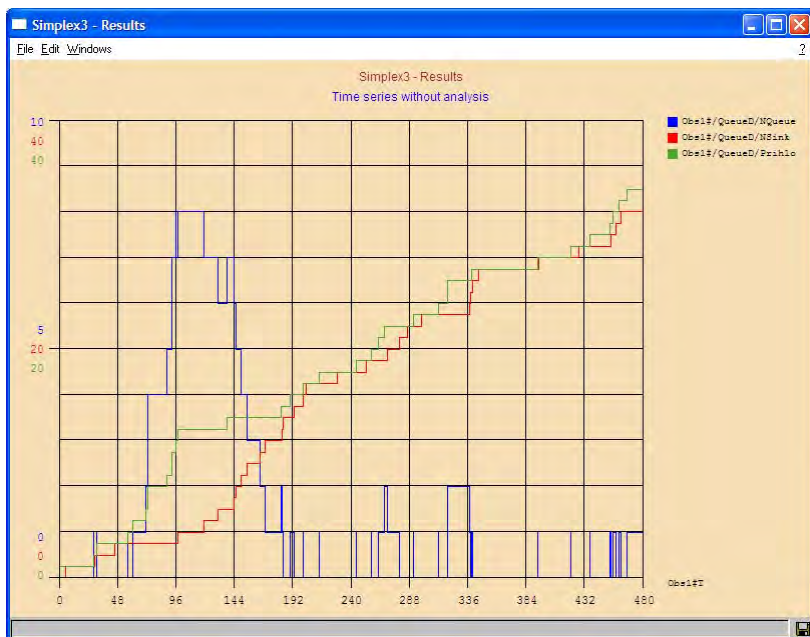


Рис. 11. Экранная форма вывода результата модели СМО в графическом виде (Имитационная система Simplex3)

Следующий вариант просчета: интенсивность прихода пациентов равняется 10 минутам, интенсивность оказания медицинских услуг составляет 10 минут. Результаты представлены на рис. 11.

В случае сезона повышенной заболеваемости происходит увеличение входного потока пациентов, что является высокой нагрузкой на врачей, а также увеличением среднего времени ожидания в очереди, что повышает риск заражения в самом учреждении и вероятность наличия пациентов, которым не будет оказана своевременная медицинская помощь

Интенсивность прихода пациентов равняется 8 минутам, интенсивность оказания медицинских услуг составляет 9 минут, результаты представлены на рис. 12. Можно сделать вывод, что несмотря на усиленный режим, медицинские учреждения не справляются с нагрузкой и происходят большие задержки по ока-

занию медицинских услуг и большое количество пациентов, которым не была оказана медицинская помощь под конец рабочего дня, достигает 9 человек в рамках очереди к одному врачу. Соответственно необходимо усиление мощностей поликлиник в период повышенной вероятности возникновения вспышек эпидемии ОРВИ, что не может быть решено только сменой режима работы поликлиники с увеличенной нагрузкой на медицинский персонал.

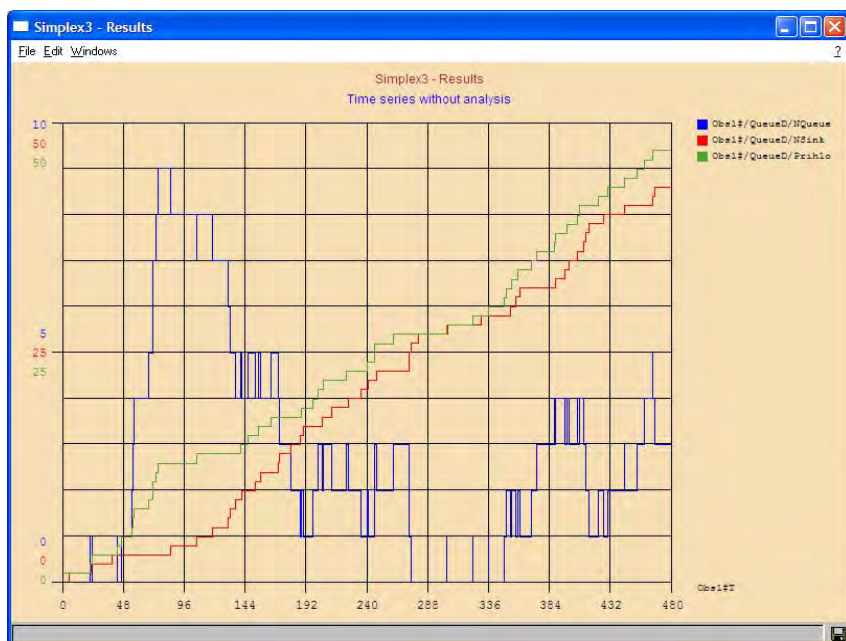


Рис. 12. Выводы результатов

Использование разработанных моделей позволяет достичь следующих целей: выявить и проанализировать влияние различных факторов на распространение инфекций: заболеваемость ОРВИ в большей степени зависит от сезонности (времени года), биозкологический аспект: экологические и климатические условия, физиологическое состояние, определяющие иммунитет человека.

Эффективной мерой предотвращения распространения вирусной инфекции, является профилактика ОРВИ — это своевременная вакцинация людей, что позволяет снизить численность заболевших до 90%. Использование защитных масок также снижает риск инфицирования, наблюдения заболеваемости в разрезе локаций показало, что данная мера будет наиболее необходима в общественном транспорте (где наиболее высокий уровень контакта с другими людьми).

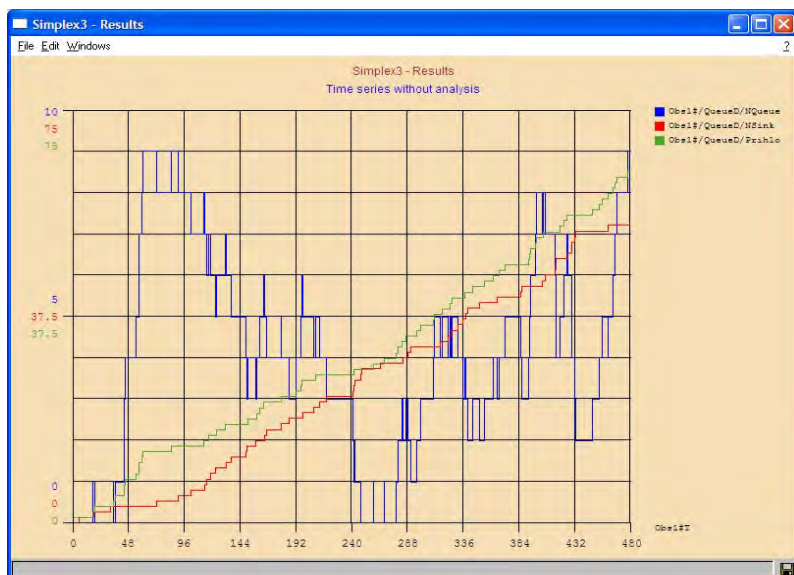


Рис. 13. Выводы результатов

Численность медицинского персонала и число врачебных ЧПУ, медицинское обслуживание позволяют сократить сроки выздоровления, соответственно, уменьшить распространение инфекции. Использование личного транспорта всего лишь на пару часов сокращает время контакта с другими людьми, позволяет избежать тесного контакта в общественном транспорте с повышенным риском заражения.

Формирование системы поддержки принятия решений

Разработанные модели интегрированы в единую систему поддержки принятия решений. Выступая в качестве подсистем, они позволят достичь синергетического эффекта комплексного использования нескольких подходов: агентного моделирования, дискретно-событийного моделирования и структурно-параметрического описания системы.

В системе поддержки принятия решений есть программный модуль структурно-параметрической модели, с помощью которого можно провести корреляционный, регрессионный анализ, прогнозировать и диагностировать аномальные ситуации. Выявить и проанализировать влияние каждого фактора на конечный результат. Для этого была использована универсальная компьютерная система («Структурно-параметрическое моделирование, прогнозирование и идентификация...» М.А. Беляева, Ю.А. Ивашкин, официальное свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 20076 12733, № 200 6613723).

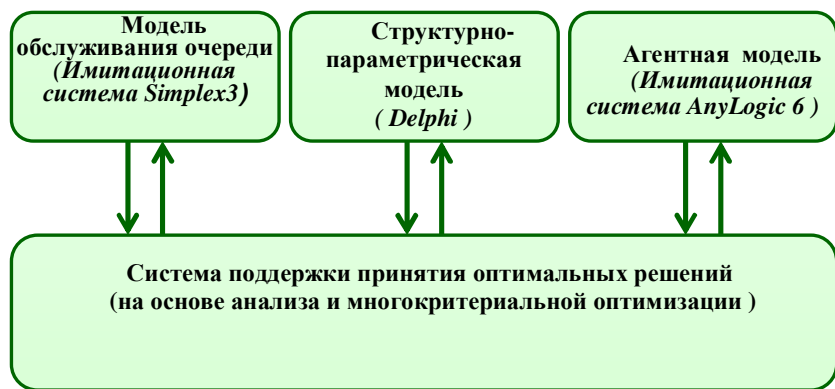


Рис. 14. Система поддержки принятия решений

Структурно-параметрическое моделирование. На рис. 15 показана экранная форма, в которой можно представить факторы и можно добавлять еще факторы при их выявлении, на рис. 16 представлена таблица исходных данных, численная реализация.

Новая модель

Файл | Строка

Параметры | Исходные данные | Корреляция | Регрессия | Диагноз | Прогноз

1	Число отделений скорой медицинской помощи, шт.
2	Число больничных учреждений, тыс.
3	Число больничных койки(инфекционный отдел), тыс.
4	Мощность врачевания амбулаторно-поликлинических учреждений, посещений в смену, тыс.
5	Число врачей(амбулаторно-поликлинических учреждений), тыс. чел.
6	Численность врачей, тыс. чел.
7	Численность среднего медицинского персонала, тыс. чел.
8	<u>ВВП, млрд. руб.</u>

Число параметров: 8

Число опытов: 15

<< К Базе Моделей

Сохранить

Рис.15. Экранная форма для ввода параметров

Новая модель

Файл | Строка

Параметры | Исходные данные | Корреляция | Регрессия | Диагноз | Прогноз

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
1	3010	13,80	152,40	3 226,19,30	347,40	1 243,8 937,3		
2	2 325,1	12,50	140,30	3 225,18,70	531,50	1 614,9 478,1		
3	3 042,1	12,80	130,10	3 221,21,50	567,30	1 844,9 756,1		
4	3 172,1	12,10	124,30	3 457,21,10	653,70	1 628,110 361		
5	3 172,1	10,70	105,70	3 533,21,30	680,20	1 563,111 217		
6	3 212,1	10,60	103,40	3 548,21,30	677,80	1 544,111 788		
7	3 252,1	10,30	99,10	3 565,21,40	682,40	1 557,112 310		
8	3 268,1	10,10	94,50	3 557,21,50	686,00	1 551,113 208		
9	3 266,1	9,80	91,30	3 577,22,10	688,20	1 545,114 156		
10	3 276,1	9,50	88,00	3 637,21,80	690,30	1 529,115 058		
11	3 223,1	7,50	84,60	3 646,18,80	702,20	1 545,116 286		
12	3 091,1	6,80	81,70	3 673,18,30	707,30	1 542,117 676		
13	3 029,1	6,50	79,10	3 651,15,60	703,80	1 511,118 604		
14	2 992,1	6,50	74,10	3 657,15,30	711,30	1 517,117 150		
15	2 840,1	6,30	74,00	3 695,15,70	715,80	1 508,117 642		

Нормативные значения:

3 010, 9,72 102,00 3 536, 19,60 656,00 1 556, 1 366,0

<< К Базе Моделей

Сохранить

Добавить параметр

Добавить опыт

Рис. 16. Экранная форма исходных данных параметров

На рис. 17, 18 представлены результаты обработки исходных численных данных, коэффициенты, корреляционный и регрессионный анализ.

На рис. 19 показан диагноз поведения системы. Диагноз показывает, какое максимальное отклонение факторов существует в исходных данных и чем обусловлено.

На рис. 20. показан прогноз системы, который позволяет выявить изменения в исследуемых факторах при изменении одного из них на заданную величину. Тем самым можно проанализировать огромное множество ситуаций и спрогнозировать развитие ситуации моделируемой области. Например, изменение величины ВВП на 3000 млн руб. повлияет на 3 фактора: численность врачей, мощность поликлиник и на количество отделений скорой помощи. Соответственно, зная прогнозируемый рост ВВП, можем рассчитать остальные факторы в моделируемой области, тем самым смоделировав само течение заболеваемости, основанное на данных факторах.

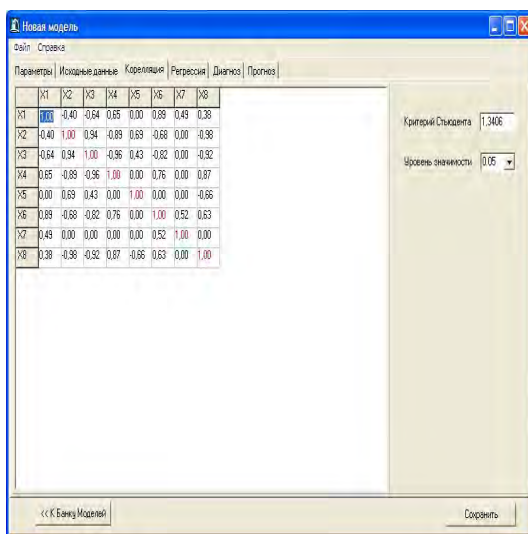


Рис. 17. Коэффициенты корреляции

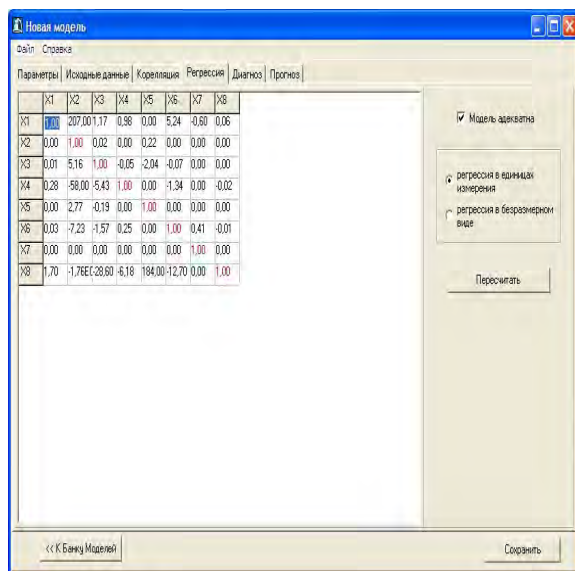


Рис. 18. Коэффициенты регрессии

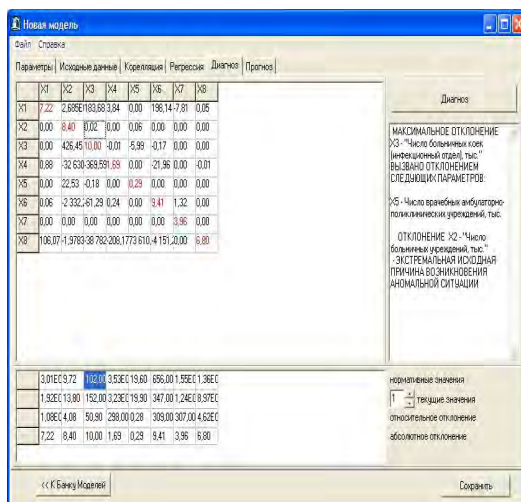


Рис. 19. Диагноз системы

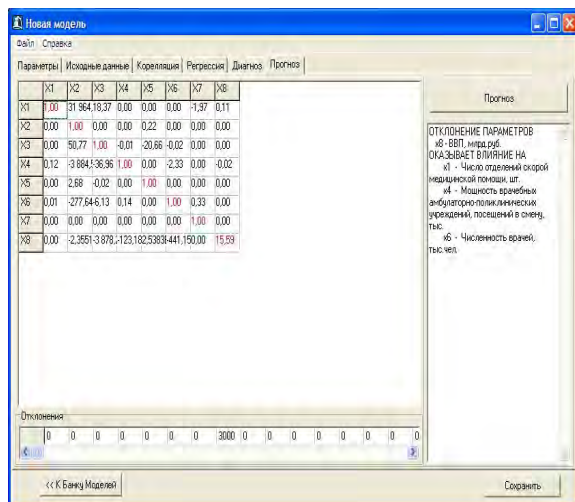


Рис. 20. Прогнозирование влияние факторов

Построение структурно-параметрической модели исследуемого процесса, связанное с представлением его в виде системы взаимодействующих элементов и подсистем, и в то же время в виде подсистемы некоторой внешней системы, сводится к следующим этапам:

1. Описание внешней системы (внешней среды, инфраструктуры), в которую исследуемый или проектируемый процесс входит в качестве составного элемента.
2. Разработка крупноблочной модели матрицы системы, каждый блок которой описывает параметры состояния функциональных подсистем и их локальные и общие цели.
3. Детализация элементов крупноблочной матрицы, при которой каждый диагональный блок может быть разделен на более мелкие составные элементы или подсистемы с детализацией внешних факторов и их влияния на элементы и подсистемы.
4. Составление параметрических моделей структурных элементов системы в виде набора векторов входных и выходных факторов и параметров состояния и заполнение главной диагонали

структурно-параметрической матрицы системы векторами параметров состояния и наблюдения.

5. Определение сопоставимых характеристик связей и взаимодействия между элементами, блоками и подсистемами большой системы методами факторного анализа, планирования эксперимента, экспертных оценок и другими, в зависимости от глубины априорных данных о природе вещей.

Заключение. Таким образом, моделирование распространения инфекции с учетом особенностей политики здравоохранения, инфраструктуры города и психологии поведения субъектов, была получена комплексная система для консолидированного представления и анализа полученных результатов. Важной задачей, достигнутой за счет применения комплексного подхода к моделированию, стала возможность принятия управленческих решений, которые могут быть использованы как на стадии предшествующей эпидемии болезни, так и во время ее. Кроме того, ввиду невозможности использования такого элемента познания как эксперимент, в силу особенностей и масштаба сферы здравоохранения, была получена модель симуляции, позволяющая проводить эксперименты для любых сочетаний параметров, а также спрогнозировать и изучить протекание заболеваемости во временных разрезах и разрезах возрастных групп, что позволило исследовать каждый фактор в совокупности и каждом срезе отдельно. Поэтому итоговые решения могут быть приняты в зависимости от желаемого эффекта использования тех или иных мер, которые могут наступить как на ранней стадии протекания эпидемии, так и на поздней — для минимизации последствий. Важная особенность разработанного комплекса достигается в единой методологии и статистического подхода, которые основаны на реальных данных с учетом нескольких лет и динамически меняющейся системы, что делает систему уникальной с точки зрения ее практического применения.

ГЛОССАРИЙ

Адекватность информации (модели) — уровень соответствия модели, создаваемой на основе имеющейся информации, реально-го объекта или процесса.

Алгоритм — совокупность правил выполнения определенных действий, обеспечивающих решение задачи.

Анализ — процесс вычленения элементарных объектов из сложного.

Вербальная модель — информационная модель в мысленной или разговорной форме.

Геометрическая модель — объект, геометрически подобный своему прототипу (оригиналу).

Системный анализ — современный метод изучения сложных явлений и процессов любой физической природы для подготовки и обоснования решений по сложным проблемам социально-экономического и научно-технического характера во всех сферах деятельности.

Прогнозирование — специальное научное исследование конкретных перспектив развития какого-либо процесса.

Управление — специально организованное воздействие на систему для достижения желаемого изменения состояния (поведения) системы и требуемых выходных ее реакций.

CASE-технологий — методология проектирования информационных систем плюс инструментальные средства, позволяющие наглядно моделировать предметную область, анализировать ее модель на всех этапах разработки и сопровождения информационной системы, а также разрабатывать приложения для пользователей.

CASE-продукт — программный продукт.

CASE-средства — программные средства, поддерживающие процессы создания и сопровождения информационных систем, такие как анализ и формулировка требований к проектированию информационной системы или к разрабатываемому бизнес-процессу.

Структура информационной технологии — это внутренняя организация, представляющая собой взаимосвязи образующих ее компонентов, объединенных в две большие группы: опорную технологию и базу знаний.

Модели предметной области — совокупность описаний, обеспечивающих взаимопонимание между пользователями: специалистами предприятия и разработчиками.

Опорная технология — совокупность аппаратных средств автоматизации, системного и инструментального программного обеспечения, на основе которых реализуются подсистемы хранения и переработки информации.

Предметная информационная технология — информационная технология в конкретной предметной области.

База знаний представляет собой совокупность знаний, хранящихся в памяти ЭВМ. Базы знаний можно разделить на интенциональную (т. е. знания о чем-то «вообще») и экстенциональную, (т. е. знания о чем-то «конкретно»). В интенциональной базе хранятся оболочки, а в экстенциональной хранятся оболочки с запоминанием, которые носят название баз данных.

Информационная система — прикладная программная подсистема, ориентированная на сбор, хранение, поиск и обработку текстовой и/или фактографической информации. Подавляющее большинство информационных систем работает в режиме диалога с пользователем.

Корпоративная информационная система (КИС) — совокупность специализированного программного обеспечения и вычислительной аппаратной платформы, на которой установлено и настроено программное обеспечение.

Непроизводственная сфера — условное наименование отраслей, результаты деятельности которых принимают преимущественно форму услуг; социальная инфраструктура общества. Обычно к непроизводственной сфере относят: жилищно-коммунальное и бытовое обслуживание населения; пассажирский транспорт; связь (по обслуживанию организаций и непроизводственной деятельности населения); здравоохранение, физическую культуру и социальное обеспечение; просвещение; культуру; искусство; науку

и научное обслуживание; управление; общественные организации.

Информационные ресурсы — отдельные документы и отдельные массивы документов в информационных системах (библиотеках, архивах, фондах, банках данных, других информационных системах).

Информационный продукт — совокупность данных, сформированная производителем для распространения в вещественной или невещественной форме. Информационный продукт может распространяться такими же способами, как и любой другой материальный продукт, с помощью услуг.

Услуга — результат непроеизводственной деятельности предприятия или лица, направленный на удовлетворение потребности человека или организации в использовании различных продуктов.

Информационная услуга — получение и предоставление в распоряжение пользователя информационных продуктов.

Инфраструктура информационного рынка — совокупность секторов, каждый из которых объединяет группу людей или организаций, предлагающих однородные информационные продукты и услуги.

Информационный процесс — процесс взаимодействия между объектами реального мира, в результате которого возникает информация.

Знаковая модель — информационная модель, описанная специальными знаками, то есть средствами любого формального языка

Информационная модель — совокупность информации об объекте или процессе.

Компьютерная модель — это модель, реализованная средствами программной среды.

Логическая модель — модель, в которой анализируются различные условия.

Математическая модель — Описание объекта или процесса набором формул, связывающих их количественные параметры.

Моделирование — исследование объектов путем построения и изучения их моделей.

Модель — упрощенное представление о реальном объекте.

Модель объекта — упрощенное представление о реальном объекте, выступающее как объект исследования.

Параметр объекта — признак, характеризующий свойства объекта.

Программа — последовательность команд (инструкций), необходимых компьютеру для решения поставленной задачи.

Словесная модель — описание мысленной информационной модели на естественном языке.

Структурная модель — представление информационной знаковой модели в виде структуры.

Циклический алгоритм — алгоритм, описывающий повторяющиеся действия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляева М.А.* Моделирование систем : методич. указания по выполнению лабораторных работ / М.А. Беляева. — М. : МГУП, 2011.
2. *Беляева М.А.* Моделирование систем : электронное учеб. пособие / М.А. Беляева. — М. : МГУП, 2010.
3. *Беляева М.А.* Многокритериальная оптимизация процессов тепловой обработки мясных полуфабрикатов при ИК-энергоподводе : автореферат на соиск. уч. ст. д.т.н. / М.А. Беляева. — М. : МГУПБ, 2009. — 50 с.
4. *Бусленко И.П.* Моделирование сложных систем / И.П. Бусленко. — М. : Наука, 1978. — 399 с.
5. *Васильев К.К.* М.Н. Служивый : учеб. пособие «Математическое моделирование систем связи» / К.К. Васильев. — УлГТУ, 2008 — 168 с.
6. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем — искусство и наука / Р. Шеннон. — М. : Мир, 1978. — 301с.
7. *Советов Б.Я.* Моделирование систем : учебник для вузов / Б.Я. Советов. — М. : Высш. шк., 2001. — 343 с.
8. *Советов Б.Я.* Информационная технология / Б.Я. Советов. — М. : Высш. шк., 1994. — 263 с.
9. *Гультияев А.В.* Визуальное моделирование в среде MATLAB : учебный курс / А.В. Гультияев. — СПб. : Питер, 2000. — 432 с.
10. *Спицнадель В.Н.* Основы системного анализа / В.Н. Спицнадель. — СПб. : Изд. дом «Бизнес-пресса», 2000. — 326 с.
11. *Яковлев С.А.* Системное моделирование процессов управления информационными ресурсами в цифровых сетях интегрального обслуживания / С.А. Яковлев, Е.В Шабуневич // *тп Сб. науч. тр. «Вычислительная техника и новые информационные технологии».* — Уфа — Изд-во. УГАТУ, 1997.
12. *Веников В.А.* Теория подобия и моделирования / В.А. Веников. — М. : Высш. шк. 1986. — 480 с.
13. Моделирование систем (<http://modelling-ru.ru>)

14. *Рыбанов А.А.* Инструментальные средства автоматизированного проектирования баз данных : учеб. пособие по дисциплине «Базы данных» для студентов направления 552800 «Информатика и вычислительная техника» / А.А. Рыбанов; РПК «Политехник». — Волгоград, 2007. — 96 с.

15. *Калянов Г.Н.* CASE: компьютерное проектирование программного обеспечения / Г.Н. Калянов. — М. : НИВЦ МГУ, Препринт, 1994. — 66 с.

16. *Клиланд Д.* Системный анализ и целевое управление : пер. с англ. / Д. Клиланд, В. Кинг — М. : Сов. радио, 1974. — 280 с.

17. *Карпов Ю.Г.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю.Г. Карпов. — СПб. : БХВ-Петербург, 2006. — 400 с.

18. *Советов Б.Я.* Моделирование систем — (2-е изд.) / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. — М. : Высш. шк., 1998. — 270 с.

19. *Шмидт Б.* Введение в имитационное моделирование в системе Simplex3 / Б. Шмидт; пер. с нем. Ю.А. Ивашкина. — М. : Наука, 2003. — 30 с.

20. Язык программирования Simula (<http://progopedia.ru/language/simula>)

21. *Ивашкин Ю.А.* Структурно-параметрическое моделирование интеллектуальных агентов и систем. — Сб. : Информационные технологии и системы. Вып. 4, Воронежская гос. технол. академия — Воронеж, 2001. — С 33–37.

22. *Шмидт Б.* Искусство моделирования и имитации. Введение в имитационную систему Simplex3 : пер. с нем.: SCS-Европа BVBA, Гент, Бельгия, 2003. — 550 с.

23. *Ивашкин Ю.А.* Агентные технологии имитационного моделирования конфликтных ситуаций. Материалы 3-й Всероссийской конференции «Теория конфликта и ее приложения» / Ю.А. Ивашкин, А.Ю. Ивашкин. — Воронеж, 2004. — С. 48–49.

24. *Снетков Н.Н.* Имитационное моделирование экономических процессов : учеб.-практич. пособие / Н.Н. Снетков. — М. : Изд. центр ЕАОИ, 2008. — 228 с.

25. *Белява М.А.* Формирование системы поддержки принятия решений в сфере здравоохранения : материалы международной студенческой школы-семинар NIT —2012. — С. 272–273

26. *Романцев В.В.* Моделирование систем массового обслуживания / В.В. Романцев, С.А. Яковлев. — СПб. : Изд. ГЭТУ, 1995. — 275 с.

27. *Клейнен Дж.* Статистические методы в имитационном моделировании / Дж. Клейнен. — М. : Статистика, Вып. 1, 2; 1978. — 335 с.

28. *Ермаков С. М.* Математический эксперимент с моделями сложных стохастических систем / С.М. Ермаков, В.Б. Мелос. — СПб. : Изд. ГУ, 1993. — 268 с.

29. *Ивашкин Ю.А.* Мультиагентное имитационное моделирование больших систем : учеб. пособие / Ю.А. Ивашкин. — М. : МГУПБ, 2008. — 230 с.

30. *Бурков В.Н.* Теория активных систем / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков; Труды междун. научно-практической конференции. — М. : ИПУ РАН. 2005. — 231 с.

Учебное издание

Беляева Марина Александровна
Моделирование систем
Часть 1

Конспект лекций

для студентов, обучающихся по специальности
220200.65 — Автоматизированные системы
обработки информации и управления
и по направлению
230100.62 — Информатика и вычислительная техника

Корректор *Н.В. Моисеева*
Компьютерная верстка *М.Е. Бараишковой*

Подписано в печать 02.11.12. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 10,93. Тираж 100 экз. Заказ № 224/224.

Московский государственный университет печати имени Ивана Федорова.
127550, Москва, ул. Прянишникова, 2а.
Отпечатано в РИЦ МГУП имени Ивана Федорова.