



ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**А. С. Акопов**

# **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА**

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом  
высшего образования в качестве учебника  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по экономическим направлениям и специальностям*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

**Москва ■ Юрайт ■ 2017**

УДК 65.012.2(075.8)

ББК 65.23я73

А40

**Автор:**

**Акопов Андраник Сумбатович** — доктор технических наук, кандидат экономических наук, профессор кафедры бизнес-аналитики факультета бизнес-информатики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», ведущий научный сотрудник Центрального экономико-математического института Российской академии наук.

**Рецензенты:**

*Кравченко Т. К.* — доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой бизнес-аналитики факультета бизнес-информатики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;

*Поспелов И. Г.* — член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математического моделирования экономических систем Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Российской академии наук;

*Бекларян Л. А.* — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Центрального экономико-математического института Российской академии наук.

**Акопов, А. С.**

А40 Имитационное моделирование : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Акопов — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 389 с. — Серия : Бакалавр. Академический курс.

ISBN 978-5-534-02528-6

В учебнике подробно описаны методы имитационного моделирования, в том числе методы системной динамики, агентного моделирования и др. Представлены основные функциональные возможности современных систем имитационного моделирования, в том числе *Powersim*, *AnyLogic* и *GPSS World*. Изучены технологии их интеграции с внешними системами и источниками данных. Рассмотрены конкретные примеры имитационных моделей, разработанных для сложных организационных структур (нефте-ных компаний, финансовых корпораций и др.).

Учебник соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

*Для студентов высших учебных заведений, бакалавров, магистров, аспирантов, преподавателей, специализирующихся в области имитационного моделирования и проектирования интеллектуальных систем управления.*

УДК 65.012.2(075.8)

ББК 65.23я73



*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».*

ISBN 978-5-534-02528-6

© Акопов А. С., 2014

© ООО «Издательство Юрайт», 2017

# Оглавление

Предисловие .....	7
Список используемых аббревиатур .....	11

## Раздел I МЕТОДОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

<b>Глава 1. Методы системной динамики .....</b>	<b>15</b>
1.1. Построение моделей системной динамики .....	15
1.2. Моделирование причинно-следственных связей .....	24
1.3. Паутинообразная равновесная модель системной динамики .....	28
1.4. Верификация и оценка устойчивости моделей системной динамики .....	32
<i>Резюме</i> .....	36
<b>Глава 2. Методы агентного моделирования .....</b>	<b>37</b>
2.1. Введение в агентное моделирование .....	37
2.2. Процедура разработки агентной модели .....	43
2.3. Агентное моделирование влияния маркетинговых мероприятий .....	45
2.4. Пространственная динамика агентов .....	47
<i>Резюме</i> .....	50
<b>Глава 3. Методы моделирования дискретно-событийных и динамических систем .....</b>	<b>52</b>
3.1. Дискретно-событийный подход в моделях системной динамики .....	52
3.2. Использование аналитических измерений для дискретизации потоков .....	56
3.3. Имитационное моделирование деятельности банка .....	58
3.4. Имитационное моделирование динамических систем .....	61
<i>Резюме</i> .....	67
<b>Глава 4. Методы стохастического имитационного моделирования .....</b>	<b>69</b>
4.1. Теоретические основы моделирования недетерминированных систем .....	69
4.2. Функции распределения случайных величин .....	74
4.3. Поддержка вероятностного моделирования в системе Powersim .....	77

4.4. Анализ достоверности результатов имитационного моделирования .....	81
<i>Резюме</i> .....	81
<b>Глава 5. Методы эволюционного моделирования .....</b>	<b>83</b>
5.1. Теоретические основы эволюционного моделирования .....	83
5.2. Схема работы классического генетического алгоритма .....	89
5.3. Поддержка генетических алгоритмов в системах имитационного моделирования .....	92
5.4. Применение генетических алгоритмов для многокритериальной оптимизации .....	95
<i>Резюме</i> .....	110
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i> .....	110
<i>Задания для самостоятельной работы</i> .....	111

## Раздел II ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

<b>Глава 6. Имитационное моделирование в системе <i>Powersim</i> ...</b>	<b>115</b>
6.1. Введение в систему имитационного моделирования <i>Powersim</i> ...	115
6.2. Разработка простейшей имитационной модели .....	120
6.3. Разработка многомерной имитационной модели .....	125
6.4. Применение сложных аналитических функций в имитационных моделях .....	128
<i>Резюме</i> .....	133
<b>Глава 7. Интеграция системы <i>Powersim</i> с внешними информационными системами .....</b>	<b>135</b>
7.1. Интеграция системы <i>Powersim</i> с программой <i>MS Excel</i> .....	135
7.2. Интеграция системы <i>Powersim</i> с базами данных .....	139
7.3. Интеграция системы <i>Powersim</i> с многомерным информационным хранилищем .....	143
7.4. Интеграция системы <i>Powersim</i> с внешними системами с использованием <i>SDK</i> .....	150
<i>Резюме</i> .....	155
<b>Глава 8. Имитационное моделирование в системе <i>AnyLogic</i> ...</b>	<b>156</b>
8.1. Введение в систему имитационного моделирования <i>AnyLogic</i> ...	156
8.2. Разработка гибридной имитационной модели .....	163
8.3. Разработка многомерной имитационной модели .....	172
8.4. Реализация численных экспериментов в системе <i>AnyLogic</i> .....	174
<i>Резюме</i> .....	179
<b>Глава 9. Интеграция системы <i>AnyLogic</i> с внешними системами .....</b>	<b>181</b>
9.1. Интеграция системы <i>AnyLogic</i> с хранилищем данных .....	181
9.2. Разработка <i>Java</i> -апплетов в системе <i>AnyLogic</i> .....	184
9.3. Нестандартные эксперименты в системе <i>AnyLogic</i> .....	186

9.4. Интеграция моделей системы <i>AnyLogic</i> с внешними приложениями <i>Java</i> .....	188
<i>Резюме</i> .....	189
<b>Глава 10. Имитационное моделирование в системе <i>GPSS World</i> .....</b>	<b>191</b>
10.1. Введение в систему имитационного моделирования <i>GPSS World</i> .....	191
10.2. Имитационная модель производственного предприятия .....	199
10.3. Оптимизационный эксперимент в системе <i>GPSS World</i> .....	208
10.4. Интеграция системы <i>GPSS World</i> с источниками данных и внешними библиотеками .....	212
<i>Резюме</i> .....	216
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i> .....	217
<i>Задания для самостоятельной работы</i> .....	218

### Раздел III ПРИМЕРЫ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

<b>Глава 11. Модели системной динамики .....</b>	<b>225</b>
11.1. Динамическая модель нефтегазодобывающего предприятия ...	225
11.2. Динамическая модель оценки акционерной стоимости нефтяной компании .....	233
11.3. Динамическая равновесная модель .....	240
11.4. Динамическая региональная модель .....	243
11.5. Динамическое моделирование стратегии банковской группы ...	246
11.6. Динамическая модель нефтеперерабатывающего предприятия .....	261
11.7. Динамическая модель трубопроводной транспортировки нефтепродуктов .....	274
11.8. Динамическая модель управления инвестициями .....	281
<i>Резюме</i> .....	284
<b>Глава 12. Агентная модель поведения толпы .....</b>	<b>285</b>
12.1. Особенности поведения толпы в экстремальных ситуациях .....	285
12.2. Модель поведения толпы при отсутствии чрезвычайных ситуаций .....	287
12.3. Модель поведения толпы при возникновении чрезвычайных ситуаций .....	291
12.4. Имитационное моделирование поведения толпы .....	296
<i>Резюме</i> .....	301
<b>Глава 13. Агентная макроэкономическая модель .....</b>	<b>302</b>
13.1. Концепция агентной макроэкономической модели .....	302
13.2. Модель поведения первой группы агентов — естественных монополий .....	305
13.3. Модель поведения второй группы агентов — других отраслей экономики .....	309
13.4. Модель поведения третьей группы агентов — конечных потребителей .....	310

13.5. Модель поведения государства.....	311
13.6. Реализация многоагентной CGE-модели.....	312
13.7. Оценка влияния фискальной политики государства.....	321
<i>Резюме</i> .....	328
<b>Глава 14. Имитационная модель нефтяной компании .....</b>	<b>329</b>
14.1. Подсистема звена нефтедобычи .....	331
14.2. Подсистема звена транспортировки.....	334
14.3. Подсистема звена нефтепереработки.....	336
14.4. Подсистема звена сбыта нефтепродуктов .....	339
14.5. Задача максимизации акционерной стоимости нефтяной компании.....	342
14.6. Программная реализация системы управления нефтяной компанией.....	344
<i>Резюме</i> .....	349
<b>Глава 15. Имитационная модель финансовой корпорации .....</b>	<b>350</b>
15.1. Структура имитационной модели.....	350
15.2. Подсистема управления банковскими видами бизнеса .....	352
15.3. Подсистема управления страховыми видами бизнеса.....	355
15.4. Подсистема управления прочими видами бизнеса .....	356
15.5. Задача максимизации акционерной стоимости финансовой корпорации.....	358
15.6. Программная реализация системы управления финансовой корпорации .....	359
<i>Резюме</i> .....	361
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i> .....	362
<i>Задания для самостоятельной работы</i> .....	362
<b>Компьютерный практикум по разработке и исследованию имитационных моделей .....</b>	<b>365</b>
1. Учебный проект имитационной модели торгового предприятия .....	365
2. Учебный проект имитационной модели выдачи кредита в банке .....	381
<b>Литература .....</b>	<b>388</b>

## Предисловие

В настоящее время подготовка управленческих решений требует принятия во внимание большого числа различных факторов, влияющих на динамику исследуемых систем. Лицам, принимающим решения, необходимо анализировать сотни различных сценариев (вариантов решений), что обуславливает необходимость разработки имитационных моделей различного типа, интеграции этих моделей с базами и хранилищами данных, создания оптимизационных модулей для имитационных моделей.

Суть имитационного моделирования заключается в компьютерной реализации математической модели изучаемой системы для использования в целях симуляции (имитации) поведения реальной системы.

Управление сложной системой, как правило, является ресурсоемким и дорогостоящим процессом. Рассмотрим в качестве примера задачу консервации малодебитных скважин на месторождениях. С одной стороны, такие скважины являются затратными для нефтедобывающего предприятия. С другой стороны, при высоких ценах на нефть малодебитные скважины становятся рентабельными, так как все затраты окупаются экспортной выручкой. Однако рост цен на нефть носит вероятностный характер, и для нефтяной компании весьма актуален вопрос: консервировать или не консервировать те или иные малодебитные скважины в текущий момент времени? Если принимается решение о консервации таких скважин, а в дальнейшем оно оказывается ошибочным, то стоимость такого неадекватного решения может быть очень велика для компании. Поэтому необходима разработка имитационной модели нефтедобычи, на которой можно было бы проиграть возможные последствия консервации скважин с учетом выростного изменения цен и спроса на нефть.

Другой пример — развитие города (*urban dynamics*). Хорошо известно, что для города важно сбалансированное развитие всех ключевых сегментов: жилищного строительства, здравоохранения, транспорта и т.д. Однако при планировании инвестиционных проектов трудно оценить последствия влияния так называемых обратных связей. Например, строительство новых жилых домов требует

развития транспортной и социальной инфраструктур (строительства новых дорог, школ, больниц и т.д.). Однако в условиях дефицита свободных территорий, характерного для современных мегаполисов, сопутствующей инфраструктуре уделяется недостаточно внимания. В результате ввод в действие новых жилых домов (в частности, точечная застройка) может ухудшить качество жизни населения в микрорайоне вместо планируемого улучшения. В данном случае, необходима разработка имитационной модели города (система класса *smarter city*), учитывающей внутренние обратные связи и позволяющей оценить последствия стратегических решений до их практической реализации.

Следующий пример относится к изучению поведения людей в различных условиях. Например, движение пешеходов, поведение толпы в замкнутом пространстве, эвакуация людей из горящего здания и т.д. При этом размещение людей в пространстве в целом носит вероятностный характер, а в условиях чрезвычайных ситуаций становится направленно хаотическим. Очевидно, что исследование таких сложных систем с вероятностными характеристиками невозможно осуществить только на основе редких реальных наблюдений. Необходимо применение имитационного моделирования для разработки сценариев оптимального управления людскими потоками.

Следует отметить, что в настоящее время сфера применения имитационного моделирования практически неограничена. Имитационные модели разрабатываются для изучения поведения отдельных предприятий и корпораций, исследования рыночного равновесия, оценки последствий государственного регулирования в экономике, оптимального управления логистическими системами, изучения эпидемиологии (прогнозирование динамики распространения заболеваний) и решения других практических задач.

Настоящий учебник предназначен для студентов высших учебных заведений (экономического и технического профиля), специализирующихся в областях бизнес-информатики, экономико-математического моделирования, прикладной математики, программной инженерии и др.

Одной из основных целей данного учебника является формирование у обучающихся знаний о современных методах имитационного моделирования и возможностях их применения для решения широкого круга задач, связанных в основном с управлением динамикой сложных организационных структур (регионов, отраслей, предприятий, групп людей и др.).

В учебнике рассматриваются важнейшие направления имитационного моделирования: системная динамика, агентное модели-



рование, дискретно-событийное моделирование, стохастическое моделирование, генетические оптимизационные алгоритмы и др.

Особенностью данного учебника является подробное рассмотрение малоизученных вопросов, связанных с интеграцией разрабатываемых имитационных моделей с внешними информационными системами, в том числе базами и хранилищами данных, внешними приложениями, оптимизационными алгоритмами и др. Данные аспекты являются критически важными при проектировании систем управления для реальных организаций. По сути описывается механизм встраивания имитационных моделей в действующую информационную архитектуру предприятия и их использования для поддержки принятия стратегических и оперативных решений. Поэтому в учебнике, в частности, описывается процедура интеграции систем имитационного моделирования *Powersim* и *AnyLogic* с информационными хранилищами *SAP BW* и *MS SQL Server*.

Таким образом, предлагается подробное изучение современных систем имитационного моделирования, в том числе *Powersim*, *AnyLogic* и *GPSS World*, с элементами программирования на языках *C#*, *Java* и технологий хранилищ данных.

В результате изучения дисциплины студент будет:

**знать**

- основные методы имитационного моделирования, включая методы системной динамики, агентного моделирования, дискретно-событийного моделирования, вероятностного моделирования и др.;
- основные этапы имитационного моделирования, включающие работу с исходными данными, построение когнитивных диаграмм, проведение экспериментов и др.;
- общую технологическую схему создания и использования имитационного моделирования;
- возможности и области применения имитационного моделирования;
- основные подходы к решению сложных оптимизационных задач с использованием имитационного моделирования;
- основные классы и принципы построения информационных систем, применяемых для практической реализации методов имитационного моделирования;
- функциональные возможности различных систем имитационного моделирования;
- методы интеграции систем имитационного моделирования с различными источниками данных и внешними приложениями;

- методы управления имитационной моделью, проведения испытаний и исследования свойств имитационной модели, анализа полученных результатов;
- возможности применения имитационного моделирования для решения широкого круга практических задач, относящихся в основном к управлению динамикой сложных систем;
- конкретные примеры реализации имитационных моделей в различных организационных структурах, в том числе в нефтяных компаниях, финансовых корпорациях, коммерческих банках и др.;

### ***уметь***

- осуществлять анализ деятельности предприятия и выявлять основные причинно-следственные связи между различными характеристиками моделируемой системы;
- разрабатывать экономико-математические модели для их последующей реализации в системах имитационного моделирования;
- применять системы имитационного моделирования для решения задач прогнозирования, сценарного (ситуационного) моделирования и анализа, интеллектуальной обработки данных, поиска оптимальных управленческих решений, оценки влияния рисков;
- проводить численные эксперименты на имитационных моделях для изучения динамики исследуемых систем;

### ***владеть***

- понятийным аппаратом имитационного моделирования, основными подходами к проектированию и использованию имитационного моделирования;
- основными методами имитационного моделирования и их практической реализации;
- навыками разработки имитационных моделей, основанных на использовании современных методов имитационного моделирования;
- основными подходами к проектированию интеллектуальных систем управления, основанных на имитационном моделировании;
- навыками интеграции имитационных моделей с различными источниками данных и внешними информационными системами.

Материал учебника соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования и включает не только обязательные разделы курса, но и дополнительные материалы, рассматривающие вопросы практического применения имитационных моделей для решения широкого круга задач.

## Список используемых аббревиатур

АС — активные системы

ВИНК — вертикально-интегрированная нефтяная компания

ВИФК — вертикально-интегрированная финансовая корпорация

ГА — генетический алгоритм

ИНС — искусственная нейронная сеть

ЛПР — лицо, принимающее решения

НГДО — нефтегазодобывающее объединение

НПЗ — нефтеперерабатывающий завод

СМО — система массового обслуживания

ЭВМ — электронно-вычислительная машина

*ABM (agent-based model)* — агентное моделирование

*BPM (business performance management)* — система управления эффективностью бизнеса

*CGE (common general equilibrium models)* — вычислимые модели общего экономического равновесия

*ERP (enterprise resource planning)* — система управления (планирования) ресурсами предприятия

*GPSS (general purpose simulation system)* — система имитационного моделирования общего назначения

*KPI (key performance indicators)* — ключевые показатели деятельности

*MAGAMO (multi-agent genetic algorithm)* — многоагентный генетический алгоритм

*MES (manufacturing enterprise planning)* — система управления производственными процессами

*SAP SEM-BPS (strategic enterprise management — business planning and simulation)* — система стратегического планирования и бизнес-моделирования, разработанная компанией *SAP AG*



# Раздел I

## МЕТОДОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

---

---

---

---

В результате изучения данного раздела студент должен:

***знать***

- основные методы имитационного моделирования;
- основные этапы имитационного моделирования;
- общую технологическую схему создания и использования имитационного моделирования;
- возможности и области применения имитационного моделирования;
- основные подходы к решению сложных оптимизационных задач с использованием имитационного моделирования;
- основные классы и принципы построения информационных систем, применяемых для практической реализации методов имитационного моделирования;
- методы управления имитационной моделью, проведения испытаний и исследования свойств имитационной модели анализа полученных результатов;

***уметь***

- осуществлять анализ деятельности предприятия и выявлять основные причинно-следственные связи между различными характеристиками моделируемой системы;

***владеть***

- понятийным аппаратом имитационного моделирования, основными подходами к проектированию и использованию имитационного моделирования.
-



# Глава 1

## МЕТОДЫ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ

### 1.1. Построение моделей системной динамики

Вначале дадим ряд важных определений.

**Моделирование** — это исследование объектов познания не непосредственно, а косвенным путем, при помощи анализа некоторых других вспомогательных объектов. Такие вспомогательные объекты мы будем называть моделями.

В настоящее время существуют и применяются различные виды моделирования, такие как:

- математическое моделирование;
- компьютерное моделирование;
- логическое моделирование;
- физическое моделирование;
- имитационное моделирование;
- графическое моделирование и др.

При этом среди данного перечня следует выделить имитационное моделирование как важнейшее направление в изучении динамики сложных систем на основе их прототипизации. Следует отметить, что построение имитационных моделей не исключает использования других методов моделирования. Например, типичной является ситуация, когда вначале разрабатывается экономико-математическая модель поведения некоторых взаимодействующих объектов (экономических агентов), а затем на ее основе проектируется имитационная модель, учитывающая вероятностные характеристики исследуемых объектов.

**Модель** — это материальный или мысленно представленный объект, который в процессе познания (изучения) замещает оригинал, сохраняя некоторые важные для данного исследования типичные свойства. Адекватно построенная имитационная модель позволяет исследовать поведение реального объекта без проведения натуральных экспериментов.

**Имитация** — это численный метод проведения экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение сложных систем во времени.

**Имитационное моделирование** — воспроизведение на ЭВМ (симуляция) процесса функционирования исследуемой системы, что позволяет исследовать состояние системы и отдельных ее элементов в определенные моменты модельного времени.

**Модельное время** — это «сжатое» время, в котором функционирует модель, или, иначе, это время, которое является имитацией времени реальной системы. Например, имитационная модель предприятия, функционирующего на горизонте стратегического планирования 20 лет, может быть «проиграна» на ЭВМ за 1 мин в режиме «сжатого» времени. Следует отметить, что реальное время прогона модели зависит не только от параметров модельного времени, но также от размерности имитационной модели, вычислительных возможностей ЭВМ и др.

**Моделирующий алгоритм** — способ реализации модельного времени в системе имитационного моделирования класса *GPSS World*. В частности, принято различать детерминированный моделирующий алгоритм (базовый алгоритм, построенный по принципу наличия постоянного шага модельного времени  $t$ ), синхронный моделирующий алгоритм, асинхронный моделирующий алгоритм и др. Подробное описание моделирующего алгоритма приводится в гл. 10.

**Имитационная модель и информационная система** — программный комплекс, представляющий собой, как правило, интеграцию системы имитационного моделирования (*Powersim, AnyLogic* и др.) с внешними информационными системами (базами данных, хранилищами данных, веб-серверами и др.). Методология интеграции систем имитационного моделирования с внешними информационными системами описана в гл. 7, 9, а конкретные примеры подобных интегрированных крупномасштабных информационных систем, разработанных для нефтяной компании и финансовой корпорации, приведены в гл. 14 и 15 соответственно.

**Методы модернизации имитационной модели** посредством информационной системы — подход в имитационном моделировании, основанный на использовании внешних программных библиотек (класса *DLL*, *JAR*-библиотек и др.), расширяющих стандартный функционал имитационной модели. В частности, имеется возможность модернизации значений любых вычислительных элементов имитационной модели (в частности, динамических переменных), реализованных в *Powersim, AnyLogic* и других системах, за счет программного управления этой моделью из внешнего



приложения. Таким образом, возможно совместное использование систем типа *Powersim* и *MatLab*, *AnyLogic* и *GPSS* и т.д. В частности, в параграфе 10.4 описаны методы интеграции системы *GPSS World* с внешними библиотеками. Подобные библиотеки могут существенно расширить стандартный функционал системы, например за счет реализации сложных вычислительных процедур.

**Возможности и область применения имитационного моделирования** определяются используемыми методами и инструментальными средствами имитационного моделирования. В настоящее время имитационное моделирование применимо практически во всех сферах деятельности, в том числе:

- для исследования поведения различных экономических субъектов (предприятий, отраслей, регионов и др.);
- поиска оптимальных стратегических и оперативных решений в различных организационных структурах;
- поддержки оптимального управления в сложных производственных системах (например, нефтеперерабатывающих заводов);
- поддержки проектирования высокотехнологичных динамических систем (например, самолетов, подводных лодок, систем связи и т.д.);
- изучения поведения социальных систем при различных сценарных условиях;
- исследования динамики распространения заболеваний, моделирования процессов в биологии, биоинженерии и здравоохранении.

Отметим, что примерам применения имитационного моделирования посвящен разд. III настоящего учебника.

**Системная динамика** — это метод имитационного моделирования, основанный на представлении системы на высоком уровне абстракции как совокупности потоков, накопителей, вспомогательных переменных и субмоделей со своими элементами.

Начало развития системной динамики было положено американским инженером Джейм Форрестером в 1950-х гг. [16, 17]. Дальнейшее развитие этого направления связано с работами Дэниса Мидоуса — моделями глобального развития человечества (*WORLD2*, *WORLD3*), разработанными при содействии Римского клуба — организации, занимающейся исследованием мировых проблем экологического и ресурсного характера. В настоящее время системная динамика принята на вооружение ведущими западными компаниями, учебно-исследовательскими центрами и др. Существует Международное общество системной динамики (URL: <http://systemdynamics.org>) со штаб-квартирой в США.

К наиболее известным научным работам по системной динамике относятся труды [16, 17, 24, 26]. В частности, в работах [16, 17] описаны архетипы системной динамики, а также возможности ее применения для моделирования деятельности производственных предприятий. При этом особое внимание уделяется влиянию обратных связей и временных лагов на характеристики исследуемых систем (*feedback theory*). Работа Денниса Медоуза «Пределы роста» [24] является хорошо известным проектом в области прогнозирования динамики мировой экономики. Данное исследование заложило основу идеи ограничения потребления ресурсов за счет промышленно слаборазвитых стран. В книге Джона Стермана [26] изучены возможности применения системной динамики для моделирования характеристик сложных бизнес-систем.

В российской экономической литературе тема системной динамики затрагивается достаточно редко. Тем не менее стоит отметить работы [1, 6, 12–14], в которых представлены примеры системно-динамических моделей, применяемых для поддержки принятия решений в различных отраслях экономики. В частности, в книге [1] рассмотрены модели системной динамики, разработанные для поддержки принятия стратегических решений предприятиями топливно-энергетического комплекса.

Разработка системно-динамической модели осуществляется в несколько этапов.

- Анализ статистических данных. Идентификация причинно-следственных связей.
- Когнитивное моделирование — разработка карты причинно-следственных связей.
- Разработка математической модели, представленной в виде динамической системы одновременных уравнений. Расчет коэффициентов модели с использованием статистических пакетов.
- Реализация математической модели на платформе имитационного моделирования, поддерживающей методы системной динамики (например, *Powersim*).
- Интеграция имитационной модели с источниками данных (*MS Excel*, базы данных).
- Проведение численных экспериментов. Калибровка модели. Верификация модели на исторических данных (подтверждение адекватности модели).
- Поиск лучших управленческих, стратегических и оперативных решений с помощью системно-динамической имитационной модели.

Такой подход позволяет исследовать поведение сложной системы во времени с учетом всех основных причинно-следственных, в том числе обратных, связей. В настоящее время активно

развиваются различные приложения системной динамики, в частности экономическая динамика, бизнес-динамика, мировая динамика, городская динамика и др.

Схема проектирования и использования системно-динамической модели представлена на рис. 1.1.

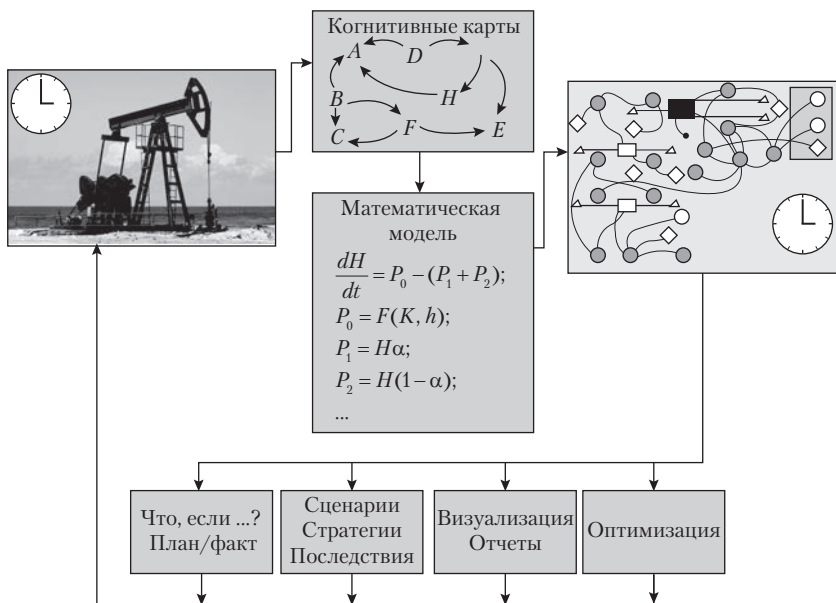


Рис. 1.1. Схема проектирования и использования системно-динамической модели

Следует отметить, что системно-динамические модели имеют следующую условную классификацию:

- *нелинейные* модели, реализуемые в виде системы одновременных нелинейных уравнений;
- *линейные* модели, реализуемые в виде системы одновременных линейных уравнений.

В свою очередь, и линейные, и нелинейные системно-динамические модели могут быть *неустойчивыми* и *устойчивыми*, с *постоянным* и *меняющимся* режимом.

Системно-динамические модели могут быть *детерминированными* и *недетерминированными*, т.е. учитывать влияние вероятностных характеристик.

Среди основных преимуществ использования системно-динамического подхода в имитационном моделировании выделяются следующие:

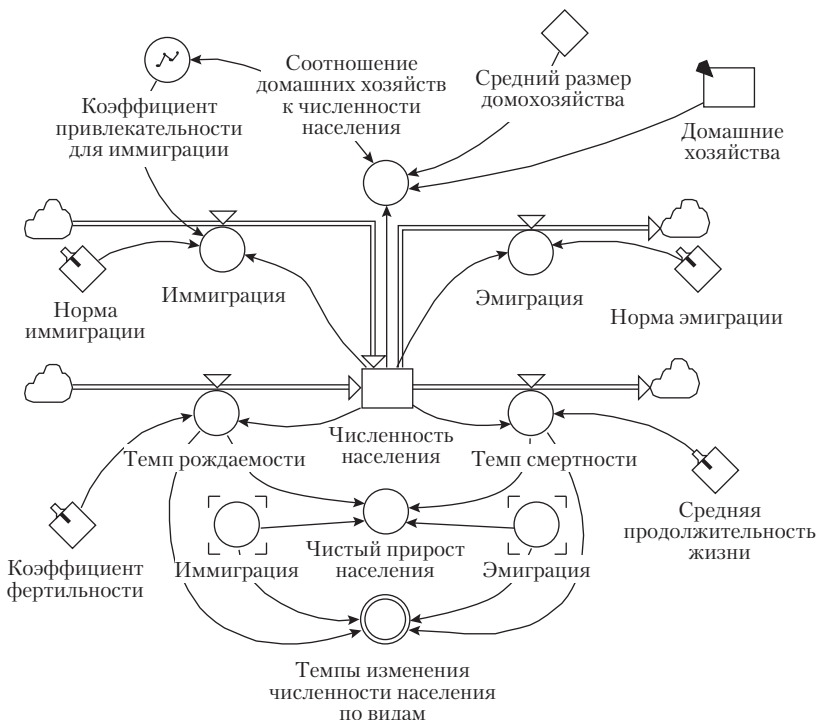
- моделирование сценариев — просчет различных вариантов будущего при изменении исходных данных;
- выявление наиболее критичных факторов в моделируемой среде с последующим ранжированием факторов влияния по степени важности угроз и возможностей;
- наглядность вводимых данных и получаемых результатов. Возможность представления в виде графа причинно-следственных связей, временных таблиц и диаграмм;
- интерактивность имитационной модели. Возможность управляющих воздействий в нужном направлении в любой момент модельного времени;
- универсальность применения технологии системной динамики. Описание моделируемых процессов дифференциальными и конечно-разностными уравнениями. Отражение движения ресурсов, контролируемое с точки зрения желаемых целей, и недопущение выхода траектории движения за многочисленные ограничения.

В настоящее время в связи с развитием вычислительных возможностей методы системной динамики поддерживаются в различных системах имитационного моделирования, в частности *Powersim Studio*, *iTHINK*, *AnyLogic* и др.

Динамическая модель, реализованная в системе *Powersim*, по сути является **системой дифференциальных уравнений в форме Коши первого рода**, описывающих процессы реального мира (например, процесс взаимодействия потребителя и производителя, производственно-технологический процесс, жизненный цикл продукта, формирование добавленной стоимости и т.д.). Модель в системе *Powersim* относится к классу вычислимых (компьютерных) моделей, использующих реальные статистические данные. Ее отличительной особенностью является визуальная форма представления (рис. 1.2).

Модель *Powersim* работает в режиме так называемого «сжатого» времени, когда фактический прогон модели на компьютере осуществляется за считанные секунды (минуты), отображая все инициированные при этом события на ось реального времени, позволяя пользователю «мгновенно» заглянуть в будущее, провести экспресс-анализ реакции системы на определенные сценарные условия и внешние воздействия (по принципу «что будет, если?»).

Пользователями такой системы являются топ-менеджеры, ученые, первые лица компаний, отвечающие за стратегическое планирование, и др.



**Рис. 1.2. Пример модели расчета динамики численности населения в системе Powersim**

Ключевыми преимуществами технологии Powersim по сравнению с традиционными методами ситуационного моделирования являются:

- поддержка системной динамики, т.е. учет сложной системой обратных связей и лаговых соотношений в моделях;
- встраиваемость имитационной модели в информационную систему компании (интеграция моделирования и прогнозирования в реальные бизнес-процессы предприятия);
- поддержка работы с многомерными структурами данных (например, расчет стоимости не только по продуктам, но и в разрезе предприятий, регионов, отраслей и т.д. одновременно, т.е. по принципу «одна формула для всей многомерной структуры данных»);
- визуальный характер всех потоковых процессов, в результате которого даже сложные процессы, ранее считавшиеся «закрытыми», становятся наглядными и самодокументируемыми (на модельном уровне);

- интегрируемость с другими программными продуктами, в том числе *MS Excel*, *SAP SEM-BPS (strategic enterprise management — business planning and simulation)*, различными базами данных (*MS SQL Server*, *Oracle* и др.), веб-серверами, геоинформационными системами и др. (через библиотеку *Powersim SDK*);
- возможность решения сложных оптимизационных задач, с помощью встроенных оптимизаторов и подключаемых генетических алгоритмов.

Реакция системы на какой-либо входной сигнал называется **переходным процессом**. Понятие переходного процесса можно применить как для состояний, так и для выходов системы. Поскольку при моделировании нас интересует значение выходов системы, то чаще переходный процесс относят к выходным сигналам. Переходный процесс — это показатель функционирования системы во времени, указывающий, как быстро и в какое новое состояние перейдет система в результате появления входного сигнала. Система находится в равновесии, если ее состояние может оставаться неизменным неограниченное время. В системе может быть несколько состояний равновесия. Она может переходить из одного состояния равновесия в другое под воздействием входных сигналов или внутренних причин. Система называется **устойчивой**, если под действием входного сигнала она переходит из одного состояния равновесия в другое.

Имитационная модель *Powersim* является динамической в смысле рассматривания во времени, но не в смысле изменения самой модели. Значения всех переменных, входящих в модель динамической системы, вычисляются в каждый момент модельного времени. Затем через определенный интервал на основе старых значений вычисляются новые значения переменных и т.д. Таким образом, модель развивается по определенной траектории в фазовом пространстве в течение заданного отрезка модельного времени.

Для построения моделей системной динамики используются переменные четырех типов: время, уровень, темп и вспомогательные переменные.

Переменная типа «время» является первичной для модели системной динамики: ее значение генерируется системным таймером и изменяется дискретно, т.е. начиная с некоторого начального значения время за каждый такт увеличивается на заранее заданную величину, которая служит единицей модельного времени. Число тактов и единица времени являются параметрами прогона модели и определяются заранее.

Переменная типа «уровень» равна объему (количеству) некоторого «продукта», накопленного в некотором резервуаре за время жизни модели с начального по текущий момент. Информационные (материальные, финансовые, людские) потоки могут поступать в этот резервуар и извлекаться из него. Значение уровневой переменной в текущий момент времени можно вычислить как сумму ее значения в предыдущий момент и величины, равной разности величин входящего и выходящего потоков продукта за единицу модельного времени. Помимо очевидных примеров, таких как уровни материальных и людских ресурсов, переменные этого типа могут характеризовать объемы накопленной информации, служить оценкой субъективных вероятностей наступления некоторых событий к определенному моменту времени, выражать меру влияния одних субъектов некоторого процесса на другие.

Переменная типа «темп» равна объему продукта, который поступает или извлекается из соответствующего резервуара в единицу модельного времени. Значение этой переменной может изменяться в зависимости от внешних воздействий на нее.

Уровни характеризуют статическое состояние системы, а темпы — ее динамику. Если, например, представить себе, что в какой то момент времени все процессы в системе остановятся, то уровни будут иметь те значения, которые были на момент остановки, а темпы будут равны нулю.

Помимо уровней и темпов, при построении моделей системной динамики используются «вспомогательные переменные» (*auxiliary*). Эти переменные могут быть равны константам или значениям математических функций от других переменных (в том числе и от переменной типа «время»), т.е. позволяют преобразовывать одни числовые значения в другие.

Простейший пример цикла с обратной связью образует входящий темп, величина которого зависит от значения уровня для резервуара, в который этот темп поступает (рис. 1.3).

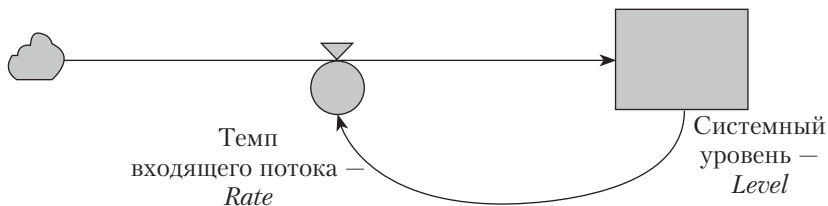


Рис. 1.3. Простейший пример цикла с обратной связью

При этом значение системного уровня для момента времени  $(t + dt)$  определяется следующим рекурсивным соотношением:

$$Level(t + dt) = Level(t) + \int_t^{t+dt} Level(t)dt.$$

## 1.2. Моделирование причинно-следственных связей

Остановимся на некоторых аспектах системной динамики более подробно. Итак, почему все-таки лучше использовать методы системной динамики (*system dynamics*) вместо традиционных методов прогнозирования, основанных на линейной регрессии? Ответ на этот непростой вопрос вытекает из понимания сложности системы, моделируемой методами системной динамики. Как правило, такая система характеризуется *наличием сотен (и тысяч) эндогенных переменных с десятками и сотнями обратных связей*. Влияние этих обратных связей (замкнутых цепочек) с течением времени усиливается (они являются аддитивными), и поэтому результаты прогнозирования будут существенно отличаться от результатов прогнозирования на основе модели линейной регрессии, не учитывающей такие связи. Таким образом, стандартный регрессионный подход теряет свою эффективность при моделировании сложных систем, особенно на долгосрочном горизонте планирования.

Выявление обратных связей — сложная задача, требующая использования современных методов реинжиниринга бизнес-процессов, спектрального анализа, кластеризации данных и др. Как правило, здесь применимы смешанные подходы, ориентированные на описание явных и скрытых обратных связей. Типичным примером явной обратной связи являются реинвестиции в основные фонды, влияющие на прибыль в одном временном периоде и формируемые из прибыли на следующем отрезке времени (обычно в конце года). В то же время совершенно неочевидное влияние инвестиций в нематериальные активы (экономику знаний) может привести к положительному эффекту в будущем.

Внедрение системы динамического моделирования на предприятии осуществляется поэтапно и разбивается на стадии.

Первой стадией динамического моделирования является анализ проблем организации, формализация цели и постановка задач. Далее следует стадия *когнитивного моделирования* — визуализированное построение причинно-следственных связей между сущностями, описывающими систему.

На этапе когнитивного моделирования осуществляются детерминация важнейших обратных связей, определение полярности и лаговых зависимостей между переменными. Для определения



причинно-следственных связей и лаговых характеристик можно использовать, в частности, тесты Гренджера, позволяющие проверить гипотезы о причинно-следственной зависимости между показателями. Следует отметить, что поддержка тестов Гренджера реализована в таких статистических пакетах, как *EViews* и др.

Принято выделять два типа обратных связей:

- балансирующие обратные связи (*balancing feedbacks*), как правило, обозначаемые литерой **B**;
- усиливающие обратные связи (*reinforcing feedbacks*), как правило, обозначаемые литерой **R**.

Единичной обратной связью является такая обратная связь, при которой временной лаг между значениями соответствующих связанных характеристик соответствует единичному моменту времени  $t$  (т.е. совпадает с шагом модельного времени).

Пример балансирующей обратной связи представлен на рис. 1.4.

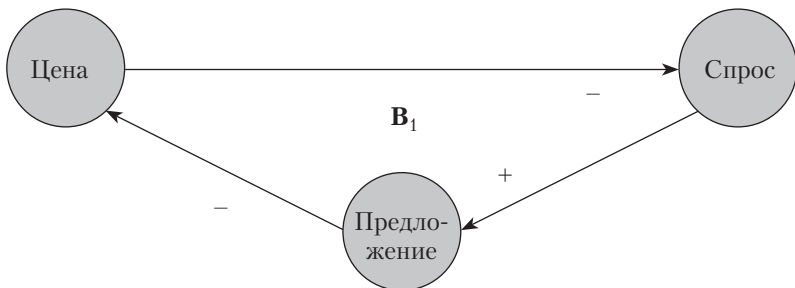


Рис. 1.4. Пример балансирующей обратной связи

Рост цен в момент времени  $t$  приводит к падению спроса, что в свою очередь приводит к избытку предложения, и как следствие, падению цен в момент времени  $t + 1$ . Здесь  $t$  — быстрое время (дни, часы и т.д.).

Пример усиливающей обратной связи представлен на рис. 1.5.

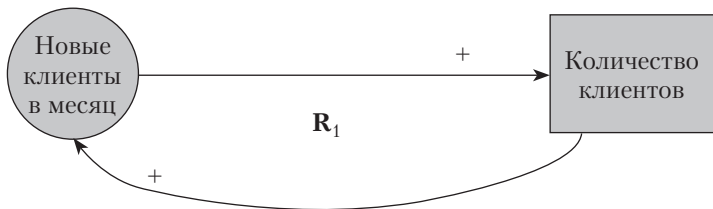


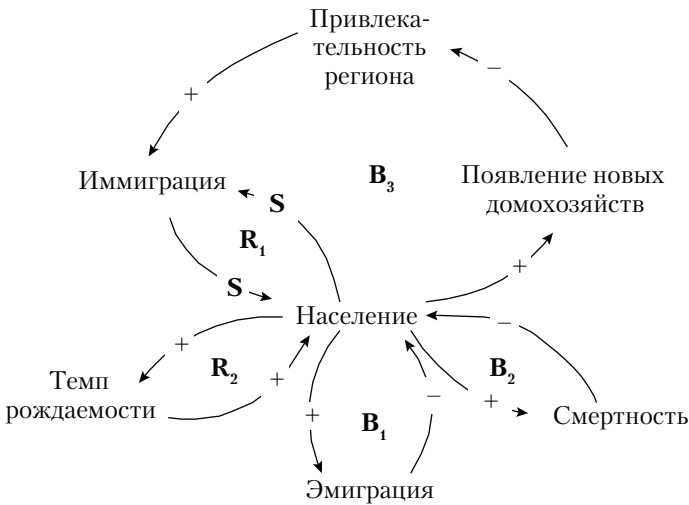
Рис. 1.5. Пример усиливающей обратной связи

Темп роста новых клиентов в момент времени  $t$  приводит к росту количества клиентов в момент времени  $t + 1$ , что в свою очередь приводит к дальнейшему росту количества клиентов.

очередь приводит к еще большему значению темпа роста новых клиентов в месяц в следующий момент времени. Такая динамика обусловлена тем, что существующие клиенты распространяют информацию о продукте компании среди своих знакомых, привлекая, таким образом, новых клиентов.

Результатом этапа когнитивного моделирования и определения обратных связей является карта причинно-следственных связей, пример которой представлен на рис. 1.6.

На рис. 1.6 заметно наличие двух усиливающих ( $R_1, R_2$ ) и трех балансирующих обратных связей ( $B_1, B_2, B_3$ ). Очевидно, что для положительной динамики численности населения рождаемость с учетом иммиграции в регион должна превышать смертность с учетом эмиграции из региона.



**Рис. 1.6. Пример когнитивной карты (динамика численности населения)**

Необходимо отметить, что наиболее значимые преимущества системной динамики стали особенно актуальными в связи с бурным развитием информационных технологий, в частности появлением интегрированных систем управления класса *ERP*, корпоративных хранилищ данных, разработок в области генетических алгоритмов и нейросетей.

*Математической (формальной) основой методов системной динамики* являются дифференциальные модели, в которых используются представления динамических процессов в пространстве состояний.

В модели системной динамики предполагается, что для основных фазовых переменных  $y_i$  (так называемых *уровней*,  $i = 1, 2, \dots, I$  —

индексы уровней) пишутся дифференциальные уравнения в форме Коши первого рода:

$$\frac{dy_i}{dt} = y_{ji}^+(t) - y_{ki}^-(t),$$

$$i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J_i, k = 1, 2, \dots, K_i,$$

где  $t$  — непрерывное модельное время;  $y_{ji}^+(t)$  — положительные темпы скоростей  $j$ -х переменных, обеспечивающих рост значения переменной  $y_i$  (притоки);  $y_{ki}^-(t)$  — отрицательные темпы скоростей  $k$ -х переменных, обеспечивающих уменьшение значения переменной  $y_i$  (оттоки).

Как правило, темпы притоков и оттоков являются эндогенными и, в свою очередь, могут быть функциями уровней:

$$y_{ji}^+(t) = f_j(y_i(t)), \quad y_{ki}^-(t) = f_k(y_i(t)),$$

$$i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J_i, k = 1, 2, \dots, K_i.$$

Экономический смысл уровней заключается в том, что они, как правило, являются ресурсами и вычисляются на определенную дату (момент времени  $t$ ), например основные фонды предприятия, активы и пассивы, объем кредитного портфеля, количество клиентов, количество продуктов на складе, численность персонала и др.

Переменных уровней, как правило, меньше, чем потоковых переменных (*rates*), а также вспомогательных переменных (*auxiliary*), и каждая потоковая переменная (темп) зависит не от всех уровней, а только от какой-то их части. При этом следует отметить, что потоковая переменная может быть функцией собственного уровня с единичным лагом (запаздыванием). Это позволяет реализовывать обратные связи в модели.

Следует отметить, что интегрирование потоков в системах имитационного моделирования, поддерживающих методы системной динамики, осуществляется автоматически.

Пусть имеется следующая линейная зависимость между уровнями и связанными с ними потоками:

$$y_{ji}^+(t) = \alpha_{ji} y_i^t, \quad y_{ki}^-(t) = \beta_{ki} y_i^t,$$

где  $\alpha_{ji}, \beta_{ki}$  — некоторые экзогенные константы.

Тогда, значение уровня, вычисляемого в момент времени  $t + dt$ , равно

$$y_i(t + dt) = y_i(t) + \int_t^{t+dt} \left( \sum_{j=1}^{J_i} y_{ji}^+(y_i(t), \alpha_{ji}) - \sum_{k=1}^{K_i} y_{ki}^-(y_i(t), \beta_{ki}) \right) dt.$$

При этом значение всех  $i$ -х уровней в начальный момент времени  $y_i(0)$  является известным (для всех  $i = 1, 2, \dots, I$ ).

Интегрирование всех входящих и исходящих потоков (притоков и оттоков) в системах имитационного моделирования на любом интервале  $[t; t + dt]$  осуществляется автоматически.

### 1.3. Паутинообразная равновесная модель системной динамики

В качестве базового примера рассмотрим динамическую паутинообразную равновесную модель, реализованную с использованием методов системной динамики.

**Паутинообразная модель** — простейшая динамическая модель, в которой формируется равновесие, характеризуемое затухающими колебаниями спроса и предложения.

Такая модель отражает формирование равновесия в отрасли с фиксированным циклом производства, когда производители, приняв решение на основании существовавших в предыдущий год цен, уже не могут изменить объем производства.

Механизм работы паутинообразной модели показан на рис. 1.7.

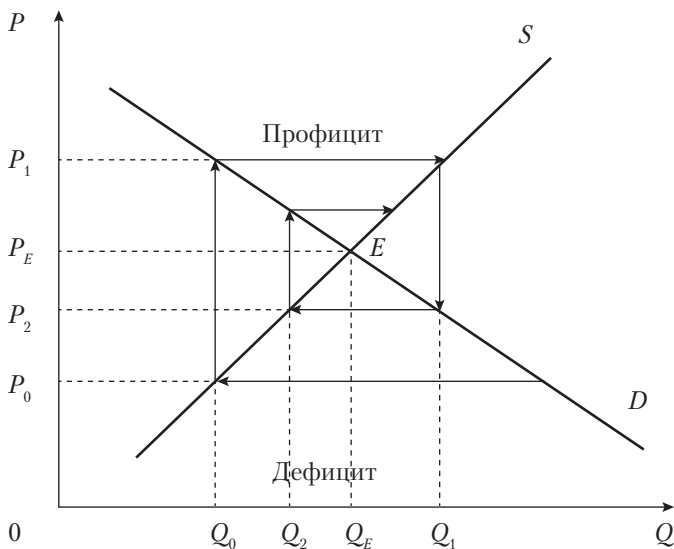


Рис. 1.7. Принцип работы паутинообразной модели

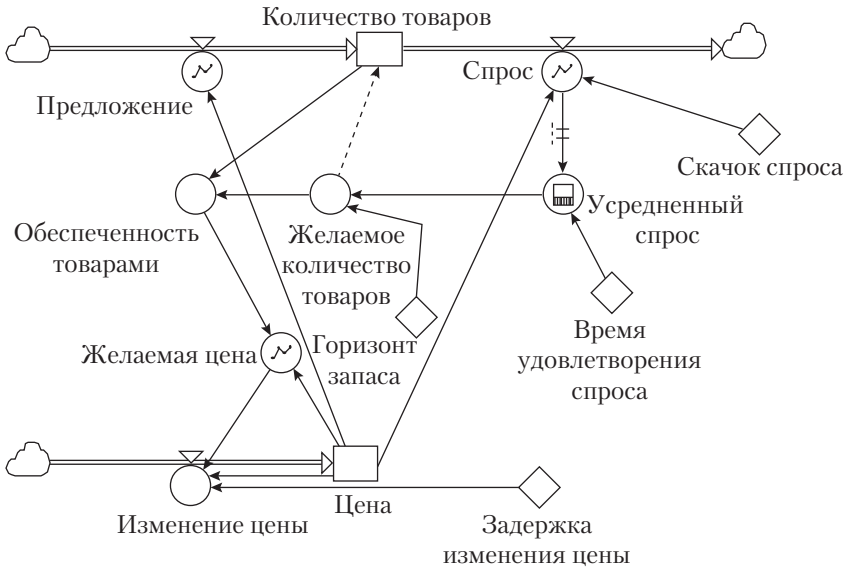
На рис 1.7 имеются два пересекающихся графика: спрос ( $D$ ) и предложение ( $S$ ).

Равновесная цена  $P_E$  — это цена, уравнивающая спрос и предложение на некоторый товар  $Q$  в результате действия конкурентных сил.

В начальный момент времени имеет место либо дефицит, либо излишки (профицит) товара вследствие выбора неравновесной начальной цены со стороны агента-производителя. Например, типична ситуация, когда производитель предлагает потребителю продукт по цене, существенно выше равновесной ( $P_1 > P_E$ ). На следующем временном шаге, производитель снижает цену до уровня  $P_2$ , чтобы ликвидировать излишки, но цена  $P_2$  оказывается ниже равновесной, поэтому возникает дефицит. Далее итерации продолжают до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие, т.е.

$$P_E = P_D = P_S, Q_E = Q_D = Q_S.$$

Реализация паутинообразной модели методом системной динамики имеет вид, представленный на рис. 1.8.



**Рис. 1.8. Реализация паутинообразной модели в системе Powersim**

Ниже представлен фрагмент программного кода, который соответствует реализации в системе Powersim рассматриваемой паутинообразной модели.

Отметим, что здесь и далее используются следующие специальные обозначения элементов модели в системе *Powersim*:

- *unit* — единица измерения показателя модели;
- *flow* — поток, входящий или исходящий по отношению к системному уровню (*level*);
- *init (level)* — начальное значение системного уровня (т.е. значение в начальный момент модельного времени);
- *aux* — вспомогательная динамическая переменная модели, значение которой, как правило, определяется некоторой формулой;
- *const* — константа модели, значение которой, как правило, не зависит от модельного времени.

Уравнения уровней:

*init* — Количество\_товаров = Желаемое\_количество\_товаров

*flow* — Количество\_товаров =  $-dt * \text{Спрос} + dt * \text{Предложение}$

*unit* — Количество\_товаров = шт.

*init* — Цена = 15

*flow* — Цена =  $+dt * \text{Изменение\_цены}$

*unit* — Цена = руб/шт.

Уравнения темпов:

*aux* — Изменение\_цены =  $(\text{Желаемая\_цена} - \text{Цена}) / \text{Задержка\_изменения\_цены}$

*unit* — Изменение\_цены = руб/шт./ед. времени

*aux* — Предложение = GRAPH (Цена, 0, 5, [0, 0, 40, 57, 68, 77, 84, 89, 94, 97, 100"Min:0;Max:100"])

*unit* — Предложение = шт/ед. времени

*aux* — Спрос = GRAPH (Цена, 5, 5, [100, 73, 57, 45, 35, 28, 22, 18, 14, 10"Min: 0;Max:100"])+STEP(Скачок\_спроса, 10)

*unit* — Спрос = шт/ед. времени

Вспомогательные уравнения:

*aux* — Желаемая\_цена = GRAPH(Обеспеченность\_товарами, 0, 5, 0, 1, [2, 1, 8, 1, 55, 1, 35, 1, 15, 1, 0, 87, 0, 75, 0, 65, 0, 55, 0, 5"Min:0.5;Max:2"])\*Цена

*unit* — Желаемая\_цена = руб.

*aux* — Желаемое\_количество\_товаров = Спрос\*Время\_удовлетворения\_спроса

*unit* — Желаемое\_количество\_товаров = шт.

*aux* — Обеспеченность\_товарами = Количество\_товаров/Желаемое\_количество\_товаров

*unit* — Обеспеченность\_товарами = безразмерная

Константы:

*const* — Время\_удовлетворения\_спроса = 4

*unit* — Время\_удовлетворения\_спроса = ед. времени

*const* — Задержка\_изменения\_цены = 15

*unit* — Задержка\_изменения\_цены = ед. времени

*const* — Скачок\_спроса = 10

*unit* — Скачок\_спроса = шт/ед. времени

В данной модели используются три табличных функции *GRAPH*, две из которых отражают известные законы спроса и предложения (рис. 1.9), а третья — изменение цены (в %), которую готовы платить покупатели в зависимости от изменения обеспеченности рынка товарами (в %).

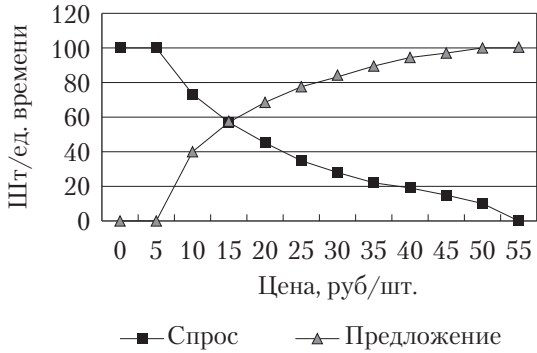


Рис. 1.9. Графики спроса и предложения

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 1.10.

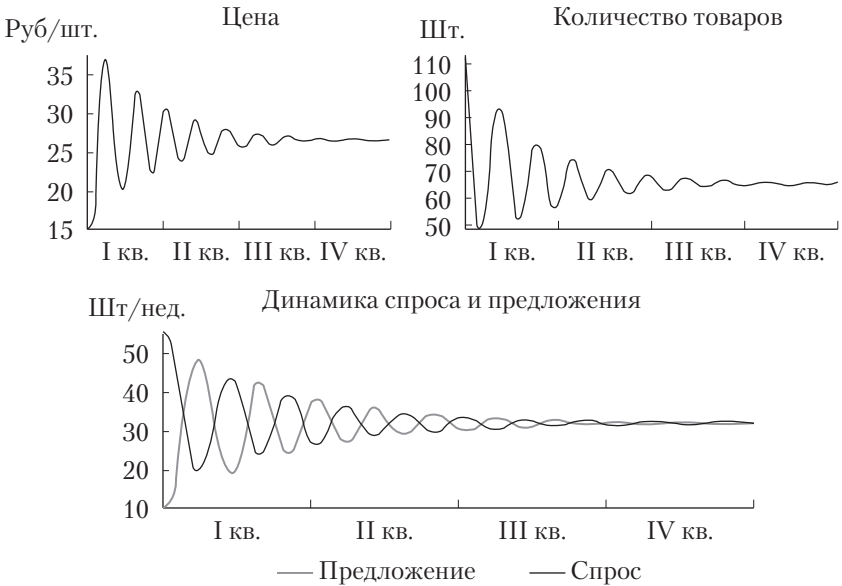


Рис. 1.10. Результаты имитационного моделирования для паутинообразной модели

Как ясно из рис. 1.10, динамика спроса и предложения носит колебательный характер. Чем выше цена, тем больше предложение и ниже спрос, и наоборот, в точке минимума цены спрос максимален, так как покупатель стремится купить товар по более низкой стоимости, при этом продавец не готов продавать за эту цену, поэтому линии спроса и предложения не пересекаются. В то же время чем ниже обеспечение товаров (количество товаров/желаемое количество товара), тем выше спрос, и наоборот.

#### 1.4. Верификация и оценка устойчивости моделей системной динамики

Важным аспектом проектирования моделей системной динамики является проведение процедур верификации и оценки устойчивости моделей по отношению к внешним возмущающим факторам.

Процедура верификации системно-динамической модели, как правило, основана на сравнении прогнозной и фактической динамики исследуемых характеристик с использованием так называемого *инверсного метода (метода наименьших квадратов)*. Для этого необходимо выделить группу ключевых показателей, значения которых будут использованы для верификации модели. Важно, чтобы элементы группы были неоднородными и некоррелируемыми, т.е. относились к различным аспектам деятельности предприятия. Исключение коррелируемых показателей из референтной группы тестируемых показателей необходимо для достижения большей адекватности модели.

Введем следующие обозначения:

- $t = t_0, t_0 + 1, \dots, T$  — модельное (ретроспективное) время;
- $KPI_i^\Phi(t)$  — фактические значения  $i$ -х ключевых показателей деятельности  $i = 1, 2, \dots, I$ ;
- $KPI_i^\Pi(t)$  — прогнозные значения  $i$ -х ключевых показателей деятельности  $i = 1, 2, \dots, I$ , формируемые в результате прогона имитационной модели.

Для оценки среднеквадратической ошибки (СКО) системно-динамической модели можно использовать следующую формулу:

$$\delta = \sqrt{\sum_{t=t_0}^T \sum_{i=1}^I \left( \frac{KPI_i^\Pi(t) - KPI_i^\Phi(t)}{KPI_i^\Phi(t)} \right)^2}.$$

Следует отметить, что существуют и другие методы верификации моделей системной динамики, являющиеся общими для оценки предикативных возможностей любых прогнозных моделей, в том числе следующие:



- *прямая верификация* — формирование прогнозных значений, что и в верифицируемой модели, но с использованием других методов прогнозирования;
- *верификация минимизацией систематических ошибок* — проверка учета источников систематических ошибок в процессе разработки модели. Для реализации данного метода нужно располагать классификацией источников ошибок.

Одним из известных способов оценки адекватности модели является прогон модели на различных отрезках горизонта прогнозирования (постоянной или переменной длины) с последующим сравнением полученных среднеквадратических ошибок:

$$\delta_{\xi} = \sqrt{\sum_{t=\xi}^{\xi+\tau} \sum_{i=1}^I \left( \frac{KPI_i^{\Pi}(t) - KPI_i^{\Phi}(t)}{KPI_i^{\Phi}(t)} \right)^2}, \quad \xi = t_0, t_0 + \tau, \dots, T - \tau, \tau \in [t_0; T];$$

$$\hat{\delta} = \max\{\delta_{\xi}\}.$$

Необходимо, чтобы максимальное значение ошибки прогнозирования не превышало некоторый допустимый уровень:  $\hat{\delta} \leq \bar{\delta}$ .

Следует отметить, что для оценки достоверности имитационной модели, функционирующей на длинном горизонте прогнозирования, можно использовать следующую формулу:

$$\delta = \sqrt{\sum_{t=t_0}^T \sum_{i=1}^I \left( w(t) \frac{KPI_i^{\Pi}(t) - KPI_i^{\Phi}(t)}{KPI_i^{\Phi}(t)} \right)^2},$$

где  $w(t)$  — заданный весовой коэффициент (например,  $w(t) = 1/t$ ).

Такой подход позволяет минимизировать влияние прогнозов на СКО, относящиеся к удаленным моментам времени  $t$ .

Следующим важным этапом проектирования имитационной модели является оценка ее устойчивости по отношению к внешним управляющим воздействиям.

Рассмотрим следующий пример оценки устойчивости для простой линейной производственной модели.

Имеется модель, реализующая производственную функцию Кобба — Дугласа вида

$$V(t) = K^{\alpha}(t)L^{\beta}(t). \quad (1.1)$$

При этом задана линейная функция спроса

$$D(t) = \left( D(0) + \sum_{\zeta=t_0}^t d(\zeta) \right) (1 + \Delta d(t)), \quad (1.2)$$

где  $D(0)$  — известный начальный спрос;  $d(t)$  — заданный темп роста спроса;  $\Delta d(t)$  — скачок спроса, %, заданный для момента времени  $t$ , значения которого не должны превышать производственных возможностей компании:

$$D(t) \leq V(t), \quad t = t_0, t_0 + 1, \dots, T. \quad (1.3)$$

Пусть динамика основных фондов и трудовых ресурсов определяется следующими линейными соотношениями:

$$K(t) = K(0) + \sum_{\zeta}^t k(\zeta); \quad (1.4)$$

$$L(t) = L(0) + \sum_{\zeta}^t l(\zeta); \quad (1.5)$$

$$\zeta = t_0, t_0 + 1, \dots, t, \quad (1.6)$$

где  $K(0)$ ,  $L(0)$  — известные начальные значения основных фондов и трудовых ресурсов;  $k(t)$ ,  $l(t)$  — заданные темпы роста основных фондов и трудовых ресурсов.

Отметим, что темпы роста основных фондов и трудовых ресурсов ограничены соответствующими инвестиционными возможностями предприятия.

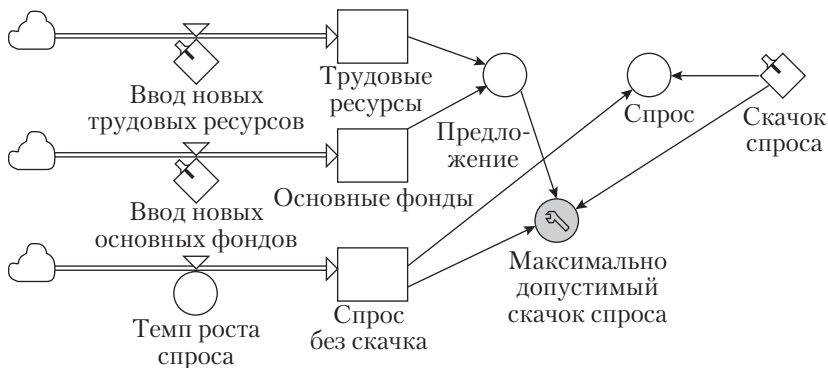
Для достижения устойчивости модели (1.1) — (1.6) необходимо выполнение следующего условия:

$$\Delta d(t) \leq \frac{\left( K(0) + \sum_{\zeta=t_0}^t k(\zeta) \right)^{\alpha} \left( L(0) + \sum_{\zeta=t_0}^t l(\zeta) \right)^{\beta}}{D(0) + \sum_{\zeta=t_0}^t d(\zeta)}, \quad (1.7)$$

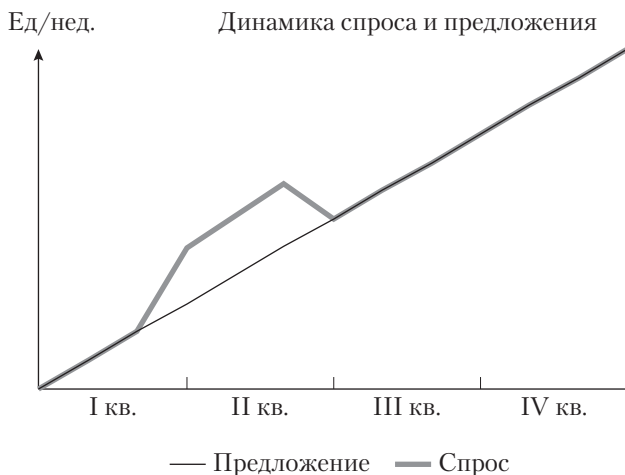
иначе производственных возможностей предприятия будет недостаточно для полного удовлетворения потребительского спроса. Реализация модели представлена на рис. 1.11.

Из рис. 1.11 ясно, что ресурсами предприятия являются трудовые ресурсы и основные фонды, а в качестве потоков выступают фиксированные темпы ввода новых трудовых ресурсов и основных фондов. Важной характеристикой данной модели является спрос на продукцию без скачка, а также скачок спроса, который задается экзогенно.

На рис. 1.12 представлен пример оценки устойчивости линейной производственной модели к 15%-ному скачку спроса в конце I квартала текущего года (длительностью в один квартал).



**Рис. 1.11. Реализация линейной производственной модели в системе Powersim**



**Рис. 1.12. Оценка устойчивости линейной производственной модели к скачку спроса**

На рис. 1.12 можно увидеть, что в течение II квартала имеет место нарушение устойчивости.

Следует отметить, что в системе Powersim имеется возможность остановить выполнение модели в случае невыполнения заданных ограничений.

Например, функция

$$\text{СТОПИФ}(\text{'Скачок спроса'} > \text{'Предложение'}/\text{'Спрос без скачка'} - 1)$$

обеспечивает остановку модели в случае невозможности выполнения ограничения (1.7).

## Резюме

Итак, методы системной динамики, рассмотренные в настоящей главе, позволяют исследовать поведение сложной системы во времени с учетом взаимодействия всех ее элементов. При этом особое внимание уделяется так называемым обратным связям (усиливающим и балансирующим), существенно влияющим на характеристики всей системы.

Одним из ключевых этапов проектирования моделей системной динамики является моделирование причинно-следственных связей между элементами модели (когнитивное моделирование). Такой подход позволяет формализовать основные зависимости в модели, выделить прямые и обратные связи, уточнить характер связей (положительные или отрицательные) и др. При этом рекомендуется использовать различные статистические методы, например тесты Грэнджера, позволяющие проверить гипотезы о причинно-следственной зависимости между показателями.

После этапа когнитивного моделирования осуществляется переход к разработке математической модели системной динамики, которая, как правило, представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши первого рода.

Затем возможна компьютерная реализация модели с использованием систем имитационного моделирования, поддерживающих методы системной динамики, в частности *Powersim Studio*.

Одним из важных этапов разработки моделей системной динамики является их верификация на реальных данных и оценка устойчивости по отношению к внешним воздействиям.

## Глава 2

# МЕТОДЫ АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 2.1. Введение в агентное моделирование

**Агентное моделирование** (*agent-based model* — *ABM*) — метод имитационного моделирования, исследующий поведение децентрализованных агентов и то, как оно определяет поведение всей системы в целом. При этом под агентами понимаются различные по своей природе элементы, например социальные агенты (люди, социальные группы, покупатели и т.д.), экономические агенты (государство, регионы, отрасли, фирмы и т.д.), технические агенты (автомобили, роботы, самолеты и т.д.), экосистемные агенты (газовые облака, пожары, тайфуны и т.д.).

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

**Мультиагентные системы** представляют собой совокупность интеллектуальных агентов. Агентное моделирование включает в себя элементы теории игр, сложных систем, мультиагентных систем и эволюционного программирования, методы Монте-Карло, использует случайные числа и др.

Поведение агента задается так называемой картой состояний (*statechart*), программируемой на индивидуальном уровне. Агентно-ориентированный подход позволяет учесть индивидуальные особенности активных элементов социально-экономической системы: людей, субъектов неживой материи (предприятий, транспортных средств и др.) и живой природы (в частности, экологических систем).

Особенности моделирования неживой материи, живой природы, общества, производственных отношений могут быть реализованы в рамках одной модели при использовании гибридных методов имитационного моделирования, например методов системной динамики и агентного моделирования. В частности, гл. 12 посвящена агентному моделированию поведения толпы

в условиях экстремальных ситуаций. Данная модель позволяет исследовать поведение ансамбля индивидуумов (общества) в чрезвычайных ситуациях, т.е. с учетом стохастического влияния неживой материи (взрывов, пожаров и др.).

**Искусственная жизнь** — изучение жизни, живых систем и их эволюции при помощи имитационных моделей. При этом особый интерес представляют заранее непредсказуемый результат взаимодействия субъектов живых систем и поиск наиболее благоприятных условий для эволюции таких систем.

**Карта состояний** (рис. 2.1) — это фактически конечный автомат с несколькими удобными дополнениями, предложенными Давидом Харелом, принятыми мировым моделирующим сообществом и вошедшими в стандартный *UML (the unified modeling language* — унифицированный язык моделирования). Карты состояний позволяют графически определить возможные состояния агента, переходы между ними, события, вызывающие эти переходы, временные задержки и действия, совершаемые агентом на протяжении своего жизненного цикла. Такие конструкции, как вложенные состояния, позволяют задавать режимы функционирования агента.

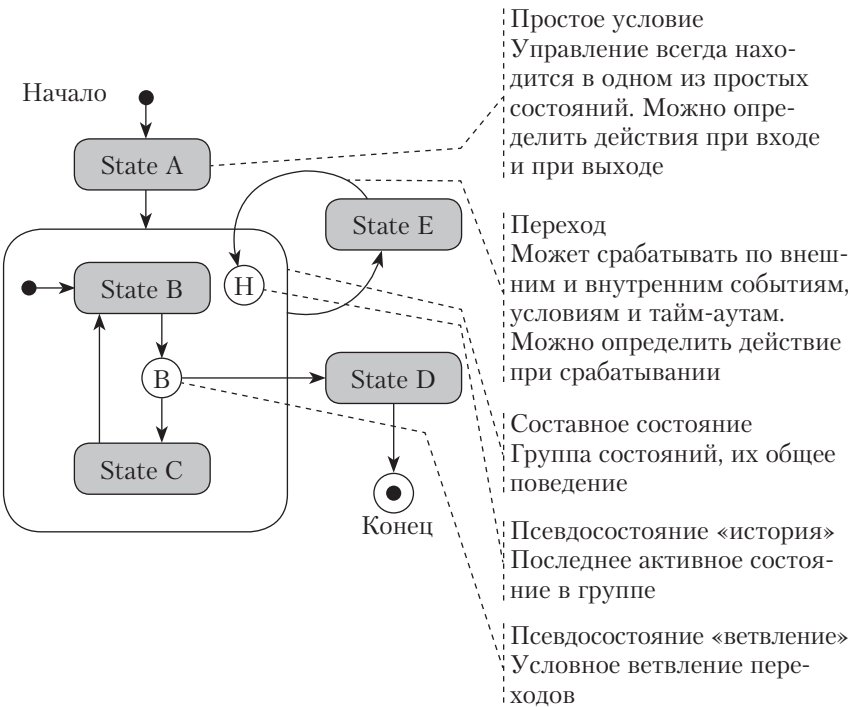


Рис. 2.1. Карта состояний агента (*statechart*)