

УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Ю. А. ИВАШКИН

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В ИМИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ SIMPLEX3



УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Ю. А. ИВАСКИН

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В ИМИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ SIMPLEX3

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для бакалавров и магистров высших учебных заведений, обучающихся по направлению 230100 «Информатика и вычислительная техника»

Москва
Лаборатория знаний

УДК 519.47.07(075)

ББК 72; 32; 81я73

И24

Серия основана в 2009 г.

Рецензенты:

Доктор физ.-мат. наук, профессор,
зав. кафедрой «Интеллектуальные технологии и системы»
Московского государственного технического
университета МИРЭА *В. В. Нечаев*

Доктор техн. наук, профессор,
зав. лабораторией «Интеллектуальные системы»
Института проблем управления РАН *Ф. Ф. Пащенко*

Ивашкин Ю. А.

И24 Мультиагентное моделирование в имитационной системе Simplex3 : учебное пособие / Ю. А. Ивашкин. — М. : Лаборатория знаний, 2016. — 350 с. : ил., [8] с. цв. вкл. — (Учебник для высшей школы).

ISBN 978-5-906828-72-9

В учебном пособии рассматриваются теоретические и практические основы мультиагентного имитационного моделирования динамических систем различной физической и социальной природы. Излагается концепция интеллектуального агента как имитационной модели поведения активного элемента в сложных ситуациях и стратегиях взаимодействия с другими активными элементами и средой для достижения цели. Описываются алгоритмы поведения агентов в различных условиях, агентные технологии идентификации и прогнозирования состояния мультиагентных систем, а также программная реализация моделей в универсальной имитационной системе *Simplex3*.

Пособие предназначено для подготовки бакалавров и магистров по направлению 230100 «Информатика и вычислительная техника» по профилю «Автоматизированные системы обработки информации и управления», а также может быть рекомендовано для системных аналитиков и разработчиков компьютерных систем поддержки принятия решения.

УДК 519.47.07(075)

ББК 72; 32; 81я73

Учебное издание

Серия: «Учебник для высшей школы»

Ивашкин Юрий Алексеевич

**МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ИМИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ Simplex3**

Учебное пособие

Ведущий редактор *Т. Г. Хохлова*. Художник *В. Е. Шкерин*
Корректор *Т. В. Евко*. Компьютерная верстка: *Е. А. Голубова*

Подписано в печать 27.11.15. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 22,00. Тираж 500 экз. Заказ

Издательство «Лаборатория знаний»

125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3

Телефон: (499) 157-5272, e-mail: info@pilotLZ.ru,

<http://www.pilotLZ.ru>

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. Общая концепция интеллектуального агента и мультиагентной системы	9
1.1. Понятие и виды интеллектуальных агентов.....	9
1.2. Функциональная структура интеллектуального агента.....	11
1.3. Эмоционально-мотивированный интеллектуальный агент.....	15
1.4. Параметрическое описание и ситуационная модель состояния агента	22
1.5. Структурно-параметрическая модель мультиагентной системы	33
Глава 2. Стратегии поведения и взаимодействия интеллектуальных агентов	39
2.1. Переговорные процессы взаимодействия агентов.....	39
2.2. Ситуационная стратегия поведения агентов.....	48
2.3. Интеллектуальные стратегии принятия решения и поведения агентов	56
2.3.1. Градиентные стратегии	56
2.3.2. Стратегии с факторным экспериментом	60
2.3.3. Симплексные стратегии	63
2.4. Индивидуальные и кооперативные ситуационные стратегии агентов	67
Глава 3. Программные средства имитационного моделирования агентов и мультиагентных систем	82
3.1. Функциональная структура универсальной имитационной системы Simplex3	85
3.2. Объектно-ориентированное описание агентов в Simplex3	88
3.3. Имитационное моделирование в системе Simplex3	90
3.3.1. Библиотеки моделей и диалоговый интерфейс ...	92
3.3.2. Организация эксперимента	95
3.3.3. Общий порядок подготовки моделей и проведения эксперимента	97

3.4. Объектно-ориентированное моделирование агентов с непрерывной динамикой поведения в Simplex3-MDL	100
3.5. Дискретно-событийные имитационные модели в программной среде Simplex3-MDL	107
3.5.1. Средства и структура описания событий.....	107
3.5.2. Условные переходы в событиях.....	111
Глава 4. Моделирование очередей и активных систем массового обслуживания в Simplex3.....	114
4.1. Мобильные компоненты и накопительные массивы ...	115
4.2. Система операций с мобильными компонентами	121
4.3. Модель СМО с неоднородными заявками	124
4.4. Агентно-ориентированная дискретно-событийная модель пассажирской железнодорожной станции	129
Глава 5. Мультиагентное моделирование в Simplex3	138
5.1. Декомпозиция модели и соединение агентов	140
5.2. Иерархические модели	147
Глава 6. Процедурные элементы Simplex-MDL	152
6.1. Собственные MDL-функции.....	152
6.2. Внешние С-функции Simplex-MDL	159
6.3. Внешние С-процедуры	165
Глава 7. Агентные технологии моделирования и имитации в Simplex3	170
7.1. Мультиагентная модель с переговорными стратегиями	170
7.2. Мультиагентная модель с рефлексивным поведением агентов	187
7.3. Мультиагентная модель с интеллектуальными ситуационными стратегиями поведения агентов	195
7.3.1. Средства и структура языка описания имитационного эксперимента Simplex-EDL	196
7.3.2. Конкурирующие агенты с симплексной стратегией ценообразования в маркетинговой ситуации	212
Глава 8. Мультиагентное моделирование систем в Simplex3	223
8.1. Мультиагентная имитационная модель производственной системы перерабатывающего предприятия агропромышленного комплекса.....	223

8.1.1. Агентная структура, модели и алгоритмы поведения агентов в логистической системе мясоперерабатывающего предприятия АПК	225
8.1.2. Мультиагентная модель логистической системы мясоперерабатывающего предприятия АПК.....	235
8.1.3. Организация и результаты имитационного эксперимента	253
8.1.4. Организация эксперимента с оптимальными стратегиями в условиях неопределенности	256
8.2. Мультиагентное моделирование образовательной системы накопления знаний	259
8.2.1. Параметрическое описание и динамика поведения обучаемого агента	261
8.2.2. Параметрическое описание и динамика поведения агента «преподаватель»	266
8.2.3. Мультиагентная модель образовательной системы.....	268
8.3. Мультиагентное моделирование живых систем	291
8.3.1. Транспортная мультиагентная модель клетки... ..	293
8.3.2. Мультиагентная иерархическая модель биологической клетки	305
Заключение.....	320
Литература	322
Приложения	327
Приложение 1. Установка программного обеспечения универсальной имитационной системы Simplex3	327
Приложение 2. MDL-описание дискретно-событийной модели пассажирской железнодорожной станции	331
Приложение 3. MDL-программы мультиагентного моделирования с ситуационной стратегией разрешения рыночного конфликта.....	337

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие по изучению агентных технологий моделирования больших активных систем различной физической и социальной природы подготовлено в результате многолетнего сотрудничества автора с кафедрой «Исследование операций и теория систем» университета Пассау (Германия), возглавляемой проф. Б. Шмидтом, а также чтения лекций по курсам «Системный анализ», «Теория принятия решения» и «Моделирование систем» в Московском государственном университете прикладной биотехнологии (МГУПБ) и специализированных дисциплин «Агентные технологии» и «Мультиагентное моделирование систем» в Московском физико-техническом институте (государственном университете).

В общей концепции интеллектуального агента и агентных технологий имитации взаимодействия динамических объектов в направлении достижения цели предлагается метод структурно-параметрического моделирования интеллектуальных агентов и мультиагентных систем с алгоритмами идентификации и прогнозирования состояния агентов, а также программная реализация мультиагентных имитационных моделей производственных, социальных и маркетинговых систем.

Для программного описания агентов и реализации мультиагентных моделей с обработкой и представлением результатов в различных формах предлагается универсальная имитационная система *Simplex3* с объектно-ориентированным языком описания моделей *Simplex-MDL*, представленным в книге Б. Шмидта «The Art of Modelling and

Simulation». SCS-Europe BVBA, Chent, Belgium 2001, переведенной автором в 2003 г. на русский язык с научным редактированием в соавторстве с проф. В. Л. Колюхом (Новосибирский государственный университет).

Некоммерческая имитационная система *Simplex3*, разработанная содружеством университетов Германии в середине 90-х гг. XX столетия для учебного процесса и научных исследований, позволяет простыми языковыми средствами осуществить построение агентно-ориентированных моделей больших и сложных систем в различных сферах деятельности с индивидуальной возможностью реализации их в предоставляемой среде экспериментирования, организации эксперимента и обработки результатов.

В связи с этим особое внимание уделено разработке и реализации мультиагентных моделей активных логистических производственных и маркетинговых систем, стратегий кооперативного и антагонистического взаимодействия агентов в социальных средах, а также агентно-ориентированному моделированию живых биологических систем в универсальной имитационной системе *Simplex3*.

Раздел 8.3.2. «Мультиагентная иерархическая модель биологической клетки» написан в соавторстве с кандидатом технических наук Ю. Л. Гордеевой.

Автор выражает благодарность кандидатам наук А. Ю. Ивашкину, Е. А. Назойкину, Л. А. Овчинниковой, А. В. Щербакову, а также выпускникам кафедры компьютерных технологий и систем МГУПБ, системным аналитикам А. А. Данилиной, С. С. Лобачевой, Е. А. Рогожкиной, Е. А. Торсуковой, Е. А. Ярковой, Л. О. Яковлевой и другим за совместную работу и творческое участие в разработке и реализации мультиагентных моделей в универсальной имитационной системе *Simplex3*.

ВВЕДЕНИЕ

Агентные технологии связаны с понятием интеллектуального агента, как некоторого интеллектуального робота (активного элемента), целенаправленно взаимодействующего с другими подобными элементами и внешней средой в заданных условиях.

По определению под *интеллектуальным агентом* понимается имитационная модель активного элемента, состояние и поведение которого в различных ситуациях достижения цели изменяются в зависимости от состояния и поведения других агентов и среды по аналогии с интеллектуальным поведением живого организма (в том числе человека) в подобных условиях.

Таким образом, агентные технологии связаны с имитацией взаимодействия интеллектуальных агентов – активных элементов динамических систем любой физической, биологической и социальной природы. Поведение и изменение состояния таких систем являются результатом пошагового взаимодействия множества ее активных элементов, характером отношений и связей между ними, условиями достижения локальной и глобальной целей и т. п. В этом случае формализация и моделирование процессов поведения и взаимодействия агентов позволяют имитировать и прогнозировать возникновение качественно новых состояний системы и оценить возможности достижения цели при разных альтернативах, а также обосновать принятие решений в сложных ситуациях риска, неопределенности и конфликта.

Решение подобной задачи аналитически или методами математического программирования с пошаговым изменением целевых функций и ограничений для каждого агента в зависимости от изменения ситуации и приближения к цели в большинстве случаев невозможно. Это обусловлено неполной, нечеткой или ошибочной информацией о состоянии и поведении активных элементов системы. Агентно-ориентированная имитация открывает новые возможности идентификации и прогнозирования состояния и поведения активной системы любой физической, социальной и биологической природы, являющейся результатом многошагового взаимодействия многих активных элементов системы и окружающей среды.

Множество взаимосвязанных агентов с индивидуальными характеристиками и поведением в какой-либо активной среде образует некоторую *мультиагентную систему*, воспроизводящую динамику взаимодействия и состояния агентов в процессе достижения общей и частных целей.

Мультиагентное имитационное моделирование активных систем — это новая концепция интеллектуальных информационных технологий. Она ориентирована на совместное использование моделей и методов естественного и искусственного интеллекта для виртуального исследования, идентификации и прогнозирования состояния и поведения активных систем в заданной среде.

Принципиальным отличием новой концепции моделирования является введение и формализация сенсорных связей (переменных) между взаимодействующими активными элементами динамической системы. Эти связи определяют изменение состояния и поведения взаимодействующих агентов и системы в целом в направлении «выживания» и достижения целей в сложных ситуациях согласия и противодействия, начальной неопределенности, риска и конфликта, неполной и нечеткой информации о степени достижения цели.

Вопросы теории интеллектуальных агентов и агентно-ориентированной имитации в различных областях разрабатываются с начала 90-х гг. прошлого столетия и нашли отражение в работах отечественных ученых: В. Н. Буркова [3],

В. А. Виттиха [1, 6], Г. П. Виноградова [5], В. И. Городецкого [7–9], Ю. А. Ивашкина [10–18], И. В. Котенко [8,22], Д. А. Новикова [3, 24], Д. А. Поспелова [25], П. О. Скобелева [31], Б. В. Соколова [26], В. Б. Тарасова [34], а также в работах зарубежных авторов: P. Baillie [41], A. J. Fougeres [44], F. Lopes [48], B. Schmidt [51–53], M. Toleman [41], Cr. Urban [54], H. Weppner [55] и др.

Однако практическая разработка мультиагентных систем является сложной задачей из-за трудностей в создании виртуальных сред функционирования агентов и собственно самих агентов. Поэтому многие работы по агентно-ориентированному моделированию имеют описательный характер и в конечном итоге сводятся к решению совокупности отдельных задач оптимизации, логистики и исследования операций без учета факторов динамического взаимодействия автономных агентов.

В данной книге предлагаются определенные возможности преодоления указанных трудностей с помощью универсальной имитационной системы *Simplex3* с объектно-ориентированным языком моделирования *Simplex-MDL*, средой эксперимента и обработки результатов.

Система *Simplex3*, разработанная в университетах Нюрнберг–Эрланген, Пассау и Магдебург (Германия) под руководством проф. Б. Шмидта, является некоммерческим программным продуктом объектно-ориентированного моделирования. Она в полной степени может быть использована для создания моделей интеллектуальных агентов с описанием их состояния, поведения и взаимодействия в реализации агентных технологий идентификации и прогнозирования достижения общей и частных целей функционирования больших и сложных систем на основе алгоритмов принятия решений и искусственного интеллекта.

Модели агентов, описываемые на языке *Simplex-MDL*, содержат естественное декларирование параметров состояния агента и сенсорных, транзитивных и случайных переменных, а также описание динамики поведения агентов с процедурами принятия решения и выбором стратегий на очередном шаге взаимодействия.

Простота синтаксических конструкций непрерывного и дискретно-событийного описания поведения агентов с внутренними и внешними процедурами и их объединения в мультиагентную модель делает универсальную имитационную систему *Simplex3* эффективным инструментарием индивидуального обучения искусству моделирования и имитации сложных ситуаций в научных исследованиях и образовательном процессе подготовки системных аналитиков.

Глава 1

ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА И МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

1.1. Понятие и виды интеллектуальных агентов

«Агент» как развитие известного понятия «объект» является, по определению Международной ассоциации по лингвистике FIRA, *«сущностью, которая находится в некоторой среде, интерпретирует ее и исполняет команды, воздействующие на среду»* (октябрь 1996 г., Токио). Агент — это программный модуль, способный выполнять заданные ему функции некоторого живого или кибернетического организма в зависимости от функций другого агента и воздействий активной среды.

В соответствии с **уровнем искусственного интеллекта и способом поведения** агенты могут быть классифицированы на следующие основные типы:

- 1) **рефлексивные агенты** — характеризуются физическим и социальным состояниями; имеют простое поведение в виде реакций на текущие изменения среды и информацию от других агентов по продукционным правилам «условие — действие»;
- 2) **знание-ориентированные агенты** — имеют физическое, социальное и когнитивное состояния; их поведение основано на априорных знаниях окружающей среды, идентификации ситуации и принятии решения для достижения цели;
- 3) **целенаправленные обучаемые интеллектуальные агенты** — располагают заданной базой знаний и иерархией целей, банком моделей поведения и стратегий достижения цели в условиях неопределенности, риска и противодействия;

- 4) *самообучающиеся целеустремленные агенты* — способны накапливать знания на основе большого объема данных и онтологии событий в процессе взаимодействия с другими агентами и окружающей средой, адаптироваться к ситуации, выбирать стратегию достижения выбранной цели и оценивать степень ее достижения;
- 5) *эмоционально-мотивированные агенты* — обладают, наряду с вышеописанными «способностями» предшествующих классов, эмоциональным состоянием и психотипом в моделях поведения человека.

Критерием интеллектуальности агента является степень полноты и глубины априорной базы знаний, стратегий и алгоритмов целеустремленного поведения в условиях неопределенности, риска и конфликта. Общий алгоритм поведения интеллектуального агента в динамической ситуации, требующей принятия решения, показан на рис. 1.1.

Поведение агента описывается, как некоторая итерационная процедура переработки данных о состоянии других агентов и среды с выбором стратегии целенаправленных действий, и представляется последовательностью операций в дискретные временные периоды — временные события.

Каждой операции соответствует свой алгоритмический и свой программный модули, обеспечивающие:

- 1) восприятие информации и накопление знаний об окружающей среде и среде взаимодействия или конфликта (сенсорный модуль);
- 2) механизм взаимодействия и обработки данных от контрагентов;
- 3) анализ собственного состояния и состояния контрагентов с выбором или коррекцией целевых функций (интеллектуальный модуль);
- 4) принятие автономных решений и выбор стратегий.

Поведение агента можно представить некоторой рекурсивной формой, которая описывает нахождение и выбор на очередном шаге функции перехода от исходного состояния к новому состоянию в направлении улучшения целевой функ-

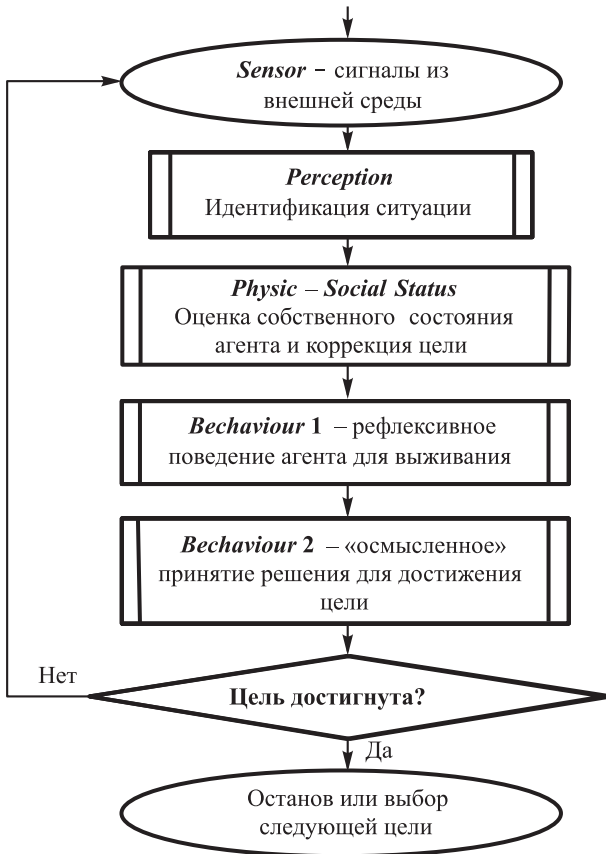


Рис. 1.1. Общий алгоритм поведения интеллектуального агента

ции. Подобная задача в отдельных случаях может быть решена методами математического программирования с коррекцией целевой функции и индивидуальных ограничений на очередном шаге изменения состояния агента в зависимости от ситуации и приближения к цели в условиях неопределенности и нечеткой информации.

1.2. Функциональная структура интеллектуального агента

Функциональная структура агента с простым поведением может быть представлена в виде компонентной схемы

(рис. 1.2) с так называемой *PSS*-структурой (*Physic-Social Status*) [52, 54]. *PSS*-структура включает базовые компоненты его физического (*Physic*) состояния и социального статуса (*Social Status*), а также функциональные компоненты *Sensor* (сенсорная информация), *Perception* (восприятие) и *Behaviour* (поведение) агента.

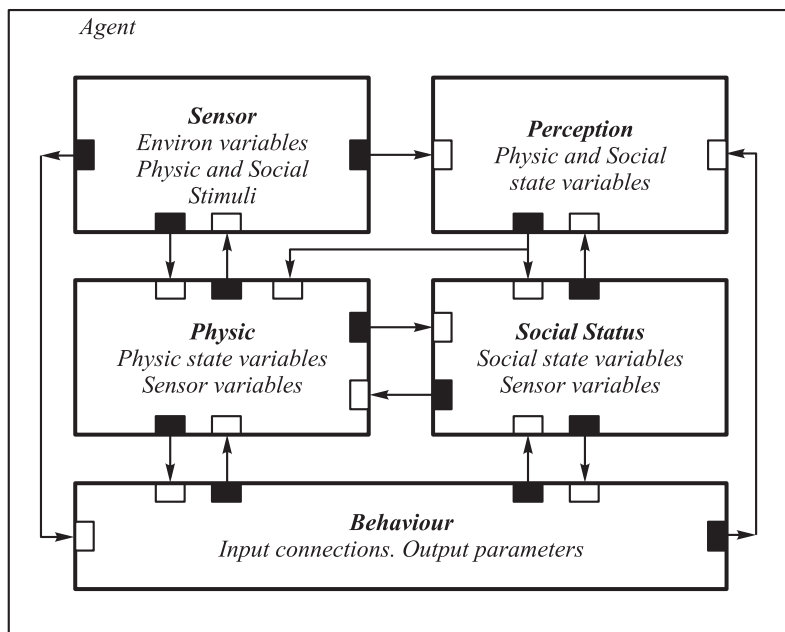


Рис. 1.2. Компонентная схема рефлексивного агента с простым поведением

Компонент *Sensor* воспроизводит внешние раздражители и сигналы из окружающей среды *Environ variables*, например изменение температуры, давления, освещенности, качества воздуха и социальных факторов, и передает форматированные сообщения и сигналы *Physic and Social Stimuli* другим компонентам состояния и поведения агента как сенсорные переменные *Sensor variables*.

Компонент *Perception* служит для идентификации текущей ситуации и состояния агента на основе входящей информации *Physic and Social state variables* о среде, физиче-

ском и социальном состоянии агента, а также стратегии его поведения. По сенсорным каналам компонент *Perception* связан с компонентами *Physic* и *Social Status*, где новая информация интегрируется с прежним состоянием агента.

Компонент *Physic* учитывает физическое состояние и характеристики агента, изменяющиеся в текущей ситуации в зависимости от внутренних связей и внешней информации, поступающей от компонентов *Sensor*, *Perception* и *Social Status*. На изменение физического состояния агента влияют также выполняемые им действия и реакции, моделируемые внутри компонента *Behaviour* и передаваемые по сенсорным каналам компоненту *Physic*.

Компонент *Social Status* строится и функционирует аналогично компоненту *Physic*. Он описывает социальное состояние агента в его взаимодействии с другими подобными агентами в достижении общей цели.

Компонент *Behaviour* реализует выбор процедур поведения агента в зависимости от его внутреннего физического и социального состояния и внешних связей *Input connections* и осуществляет «принятие решения» в возникшей ситуации. Содержащиеся в компоненте *Behaviour* алгоритмы действий агента могут быть активированы многократно в заданные моменты времени. Условия активизации определяются переменными состояниями компонентов *Physic* и *Social Status* и продукционными правилами реактивного поведения агента в возможных ситуациях.

Описанная компонентно-ориентированная модель *PSS*-агента (см. рис. 1.2) представляет общую конструктивную схему рефлексивных агентов с простым поведением в среде выживания.

При моделировании **знание-ориентированных** и **эмоционально-мотивированных** агентов с базой знаний, множеством целей и стратегий их достижения в условиях неопределенности и самообучения, рассмотренная модель дополняется компонентами интеллектуального (*Cognition*) и эмоционального (*Emotion*) состояний агента (рис. 1.3).

Компонент *Cognition* воспроизводит и реализует интеллектуальные возможности агента в процессах обработки и на-

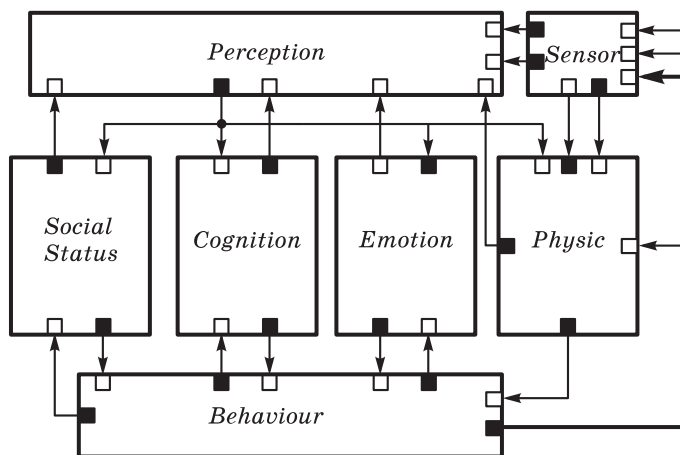


Рис. 1.3. Компонентная схема знание-ориентированного агента

копления информации о внешнем окружении и внутреннем состоянии агента, выборе целей и стратегий поведения, планировании и оценке действий в ходе процесса обучения на опыте прошлого и принятия текущих решений. После исполнения определенных действий, изменяющих внутреннее состояние агента или его окружающей среды, в компоненте *Cognition* происходит оценка степени достижения цели. В случае негативного результата выбирается новая стратегия приближения к желаемому целевому состоянию.

В процессе «жизнедеятельности» память наполняется реализованными планами действий, которые агент может использовать позднее при выборе своего поведения.

От компонента *Perception* на сенсорные входы *Cognition* может быть вызвана дискретная информация о состоянии окружающей среды, а также актуальная информация о физическом, эмоциональном, когнитивном и социальном состояниях агента, которые обрабатываются в процессах идентификации ситуации.

Вместе с тем компонент *Cognition* в рамках рефлексивной динамики связан с внутренним состоянием компонента *Behaviour* и может считывать информацию о мотивах деятельности, представляющих исходные данные для когни-

тивных процессов, а также ответные сообщения о принятых решениях и выбранном плане действий.

Динамика состояния компонента *Cognition* связана с процедурами актуализации знаний и выбора стратегий достижения целей на основе внутренней и внешней информации, генерации и накопления новых знаний, расчета когнитивных переменных состояния агента.

Компонент *Emotion* отражает эмоциональное состояние агента и его влияние на восприятие текущей ситуации и поведение при определенных физических, когнитивных и социальных факторах. Этот компонент описывается переменными эмоционального состояния агента, принимающими дискретные и непрерывные значения в зависимости от временных и условных событий и *психотипа* агента. В текущих ситуациях эмоциональное состояние может изменяться скачкообразно или непрерывно, вызывая различные эмоциональные реакции агента на поступающую информацию, действия других агентов, состояние физической или социальной среды. С включением компонента *Emotion*, описанная функциональная структура интеллектуального агента представляет концептуальную модель **эмоционально-мотивированного** интеллектуального поведения человека в различных условиях.

1.3. Эмоционально-мотивированный интеллектуальный агент

Общее состояние агента формализуется на основе параметрических описаний его интеллектуального, эмоционального, психофизиологического и социального состояний в окружающей среде. Из перечисленных областей описания наиболее слабоформализованным является *эмоциональное состояние* агента, имеющее множество различных градаций от радости и эмоционального подъема до безразличия, беспокойства и страха в зависимости от факторов психофизиологического и интеллектуального состояний, а также текущей информации об удовлетворении желания и достижении цели [11].

Уровень положительных и отрицательных эмоций, усиливающих и уменьшающих биоэнергетический потенциал агента, коррелирует с количеством текущей информации, ее избыточностью или недостаточностью в оценке ситуации, а также степенью несоответствия между ожидаемым и достигнутым результатами [32, 33].

Изменение эмоционального состояния ΔE может оцениваться в балльной шкале от максимума положительных до максимума отрицательных эмоций и является некоторой функцией Φ от изменения энтропии ΔH достижения цели:

$$\Delta E = \Phi [H_t(z) - H_0(z)], \quad (1.1)$$

где $H_t(z)$ и $H_0(z)$ — текущая и начальная энтропии достижения цели, обусловленные неопределенностью ситуации с множеством альтернатив и исходов принятия решения.

Исходная энтропия достижения цели $H_0(z)$ характеризует начальную неопределенность и сложность принятия решения по достижению цели и оценивается агентом на основе априорной базы знаний, концептуальной модели и других характеристик его интеллектуального состояния.

Неопределенность ситуации возникает при множестве возможных состояний, случайности факторов и отсутствии полной информации и оценивается энтропией параметров состояния агента x и его целевой функции z как

$$H(x, z) = H(x) + H(z), \quad (1.2)$$

где

$H(x) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} P(x_{ik}) \cdot \log_2 P(x_{ik})$ — энтропия параметров состояния X с вероятностями $P(x_{ik})$ k -го значения i -го параметра;

$H(z) = -\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{R_i} P(z_{jk}) \cdot \log_2 P(z_{jk})$ — энтропия целевой функции z ;

цели z ;

$P(z_{ik})$ — вероятность k -го уровня j -го фактора целевой функции.

Исходная энтропия $H_0(z)$ является мерой оценки недостаточности исходных знаний для выбора наилучшей стратегии достижения цели. При известных вероятностях альтернатив $P(a_i)$; $i = \overline{1, n}$ и условных вероятностях $P(z_j / a_i)$ j -го исхода при i -й альтернативе $H_0(z)$ определяется по известной формуле:

$$H_0(z) = - \sum_{i=1}^n P(a_i) \sum_{j=1}^m P(z_j / a_i) \cdot \log_2 P(z_j / a_i). \quad (1.3)$$

Текущая энтропия $H_t(z)$ зависит от информации, которую агент получает в текущий момент времени или после очередного шага продвижения к цели.

Из формулы (1.1) видно, что уменьшение энтропии $H_t(z)$ по отношению к $H_0(z)$ подтверждает правильность движения в направлении цели и вызывает положительное изменение эмоционального состояния ΔE , соответствующее положительным эмоциям — радости и самоутверждению в дальнейшем продвижении к желаемой цели, а увеличение — возникновение отрицательных эмоций — ΔE с увеличением эмоциональной напряженности ожидания, депрессии, разочарования и страха.

При $H_t(z) = 0$ достигается максимум положительной эмоции хорошего настроения и удовлетворения в связи с достижением цели.

При $H_t(z) = H_0(z)$ агент не получает новой информации и его эмоциональное состояние не изменяется. В случае повторения данной ситуации информация становится избыточной и в конечном итоге вызывает отрицательный эмоциональный эффект.

В общем случае все множество положительных и отрицательных эмоций отражается точкой в многомерном пространстве с координатами e_i ($i = \overline{1, 15}$) эмоциональных составляющих [41]: *счастье, грусть, злость, скука, сомнение, надежда, страх, интерес, презрение, отвращение, разочарование, удивление, гордость, стыд, чувство вины*, определяющих в балльной шкале 15-мерный вектор эмоционального состояния агента с модулем

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2}. \quad (1.4)$$

При этом каждая i -я координата n -мерного эмоционального пространства является функцией (1.1) от текущей энтропии цели Z . Изменение вектора эмоционального состояния в n -мерном пространстве имеет вид:

$$\Delta E = \sqrt{\sum_{i=1}^n \varphi_i^2 [H_t(z) - H_0(z)]}, \quad (1.5)$$

где φ — функция изменения i -й составляющей e_i эмоционального состояния от изменения энтропии достижения цели.

Каждой точке эмоционального пространства соответствует конкретная *эмоциональная реакция* агента. Бесконечное множество возможных реакций на событие в текущий момент времени t можно кластеризировать по шести видам отношения к событию $Q_{i,t}$; $i = \overline{1,6}$, а именно: *удовольствие, ожидание, готовность к действию, уверенность, созерцательность, ответственность*, с принятием соответствующего решения к дальнейшим действиям.

Эмоциональная реакция i -го вида определяется множественной регрессией ее интенсивности от значений координат e_j ; $j = \overline{1,15}$ точки эмоционального пространства (ЭП):

$$Q_i = p_{i0} + \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} e_j; \quad i = \overline{1,6} \quad (1.6)$$

или

$$\Delta Q_i = \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} \Delta e_j; \quad i = \overline{1,6}, \quad (1.7)$$

где m_i — число эмоций, имеющих сильную корреляционную связь с i -й областью эмоциональной реакции агента; $p_{i0}, p_{i1}, \dots, p_{im_i}$ — коэффициенты линейной множественной регрессии.

Экспертные оценки от 0 до 1 координат эмоционального пространства и эмоциональной реакции накапливаются в результате заполнения анкет (табл. 1.1) так, что суммы оценок эмоционального состояния (выделенных курсивом) и видов реакции равны 1.

Таблица 1.1

**Экспертные оценки эмоционального состояния
и эмоциональной реакции агента**

Эмоциональное состояние агента											Эмоциональная реакция						
№	Дата	Грусть	Скука	Сомнение	Надежда	Страх	Интерес	Разочарование	Удивление	Гордость	Вина	Удовольствие	Дискомфорт	Уверенность	Созерцательность	Ожидание	Безразличие
1																	
2																	
...	...																

По экспертным оценкам (см. табл. 1.1) и экспериментальным данным рассчитываются коэффициенты корреляции между величиной i -й реакции и j -й координатой точки эмоционального пространства:

$$r_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \frac{(Q_{ki} - \bar{Q}_i)(e_{kj} - \bar{e}_j)}{\sqrt{S_{Q_i}^2} \sqrt{S_{e_j}^2}}; \quad i = \overline{1,6}; \quad j = \overline{1,15}, \quad (1.8)$$

где \bar{Q}_i, Q_{ki} — математическое ожидание величины i -й эмоциональной реакции агента и наблюдаемая реакция в k -м наблюдении; \bar{e}_j, e_{kj} — математическое ожидание и величина j -й эмоциональной координаты в k -м наблюдении в балльной шкале.

Далее, выделяя для каждой реакции группы сильно связанных координат ($r_{ij} \geq 0,6$), рассчитываются коэффициенты $p_{i0}, p_{i1}, \dots, p_{im_i}$ линейной множественной регрессии i -й реакции от координат эмоционального пространства. Для максимального значения ожидаемой величины i -й эмоциональной реакции агента $Q_{i \max}$ определяется эмоционально-мотивированный шаг продвижения агента к цели, достижению согласия, разрастанию конфликта и другим событиям.

Таким образом, при известных или задаваемых функциях φ_i (1.5) после очередного события по формулам (1.4), (1.5) определяется модуль и координаты вектора эмоционального состояния агента и затем по (1.6) — область наиболее интенсивной эмоциональной реакции $Q_{i \max}$, обуславливающей дальнейшие его действия.

Одним из главных факторов, влияющих на изменение эмоционального состояния агента и его эмоциональную реакцию на конкретную ситуацию, является *психотип* агента:

- 1) сильный, уравновешенный, подвижный (*сангвиник*);
- 2) сильный, уравновешенный, инертный (*флегматик*);
- 3) сильный, неуравновешенный, подвижный (*холерик*);
- 4) слабый, неуравновешенный (*меланхолик*).

Каждому отдельному типу темперамента свойственны свои характерные особенности.

Агент-сангвиник обладает большой скоростью реакции с высокой сопротивляемостью трудностям и противодействию, легко переключается с одной стратегии на другую; в стрессовой ситуации действует активно, сохраняя самообладание.

Агент-флегматик обладает сильной, уравновешенной, но инертной нервной системой; на внешнее воздействие реагирует медленно, неразговорчив, уравновешен, хорошо противостоит сильному и продолжительному воздействию, но не способен быстро реагировать в неожиданных ситуациях; не любит менять привычки и стратегии поведения; трудно приспосабливается к новым условиям и колеблется, принимая решение.

Агент-холерик характеризуется преобладанием возбуждения над торможением, вследствие чего он быстро и часто необдуманно реагирует на внешнее воздействие; нетерпелив, ожидание выводит его из себя; в критические моменты работает долго и неудержимо; характерная черта — непостоянство, поведение агента-холерика в условиях неопределенности непредсказуемо.

Агент-меланхолик чувствителен даже к слабым отрицательным воздействиям, а сильный раздражитель может вызвать срыв; его настроение очень изменчиво, и даже незначительный повод может вызвать обиду, слезы; часто грустен, подавлен, не уверен в себе, тревожен.

Эмоциональное состояние агентов выделенных типов отражается в динамике их поведения особенно в условиях неопределенности, риска и противодействия, а также в переговорных процессах с другими агентами, вызывая страсть, удовольствие, страх, боль и другие составляющие.

Взаимодействие «**сангвиник — холерик**» может перерасти в конфронтацию и соперничество за лидерство. Согласие достигается за счет взаимных уступок и гибкого отхода сангвиника от возможного конфликта.

Во взаимодействии «**холерик — флегматик**» каждый агент дополняет друг друга. Флегматик может уступить взрывному и непредсказуемому настроению холерика, если дело не касается принципиальных моментов.

Отношения психотипов «**меланхолик — сангвиник**», дополняющих друг друга как противоположности, при взаимном положительном восприятии могут быстро приводить к согласию.

В переговорных процессах «**меланхолик — флегматик**» меланхолику может не нравиться медлительность и пассивность флегматика, а флегматику — повышенная тревожность и излишнее беспокойство меланхолика.

В случае взаимодействия «**сангвиник — флегматик**» при социальной активности сангвиника и трудолюбии и основательности флегматика стороны чувствуют практическую необходимость друг в друге. Обычно в этой связке сангвиник лидирует, а флегматик оказывается ведомым.

Наконец, контакт «меланхолик—холерик» представляет партнерство, в котором властный холерик быстро подчиняет робкого и тихого меланхолика. Суждения холерика больно задевают чувствительного меланхолика. Отсюда возникают напряжение, дискомфорт, взаимные обвинения. Согласие достигается лишь в ситуациях, когда холерик может опекасть или брать под свою защиту меланхолика.

Вербальные описания особенностей состояния и взаимодействия четырех типов агентов могут быть **формализованы в переменных состояниях и поведения** эмоционально-мотивированных интеллектуальных агентов.

Во многих случаях взаимодействие агентов связано с **переговорными процессами** и достижением согласия путем **интерактивного обмена информацией в форме предложений и контрпредложений**. При этом более осторожный и спокойный агент задает менее резкий шаг предложений, чем нервный и экспрессивный.

Учет эмоционального состояния и психотипа агента в стратегии поведения эмоционально-мотивированного агента позволяет наблюдать, как внутреннее состояние агента отражается на процессах взаимодействия, стабилизации ситуации и разрешении конфликта.

1.4. Параметрическое описание и ситуационная модель состояния агента

В общем виде параметрическое описание эмоционально-мотивированного интеллектуального агента Ag_i в мульти-агентной системе $Agents = \{Ag_1, Ag_2, \dots, Ag_n\}$ представляется в соответствии с функциональной схемой агента (см. рис. 1.3) кортежем параметров и переменных его интеллектуального I , эмоционального Em и социального So состояний, параметрами персональных физических свойств Ph_i , глобальной Z_0 и локальных целей z_i , стратегий их достижения и внешних связей [48]:

$$AgS_i = \langle Z_i, I_i, Em_i, So_i, Ph_i, PL_i, Ev_i \rangle ; i = \overline{1, n}, \quad (1.9)$$

[. . .]

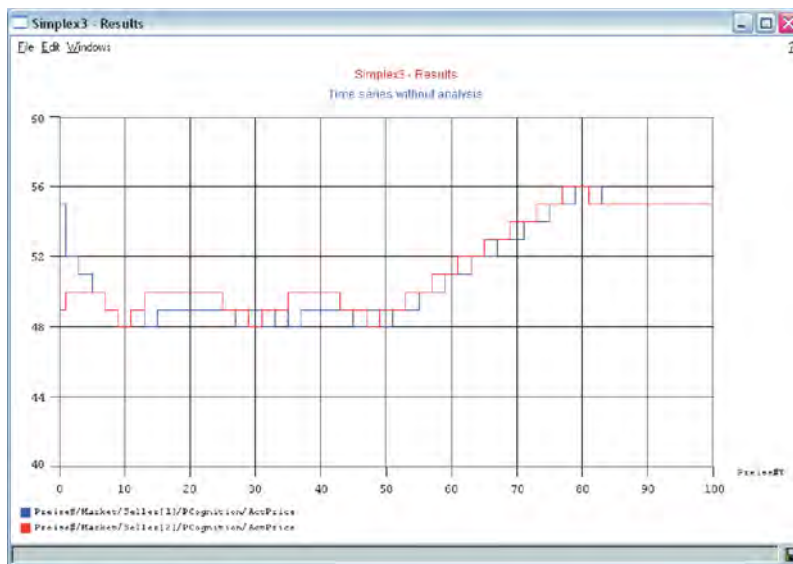


Рис. 2.20. Процесс взаимодействия двух спокойных агентов при начальных ценах $Act Price = \{55, 49\}$, критериях эффективности стратегии $Criterion \{150, 100\}$; $Person = \{calm, calm\}$

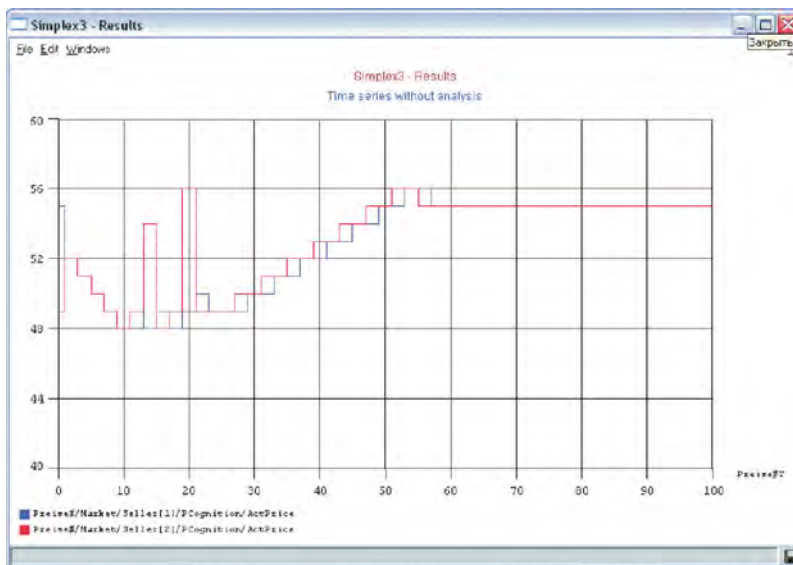


Рис. 2.21. Взаимодействие спокойного *Seller1* и экспрессивно-го *Seller2* агентов при $ActPrice = \{55, 49 \text{ у.е.}\}$, $Criterion \{150, 100\}$; $Person = \{calm, nervous\}$

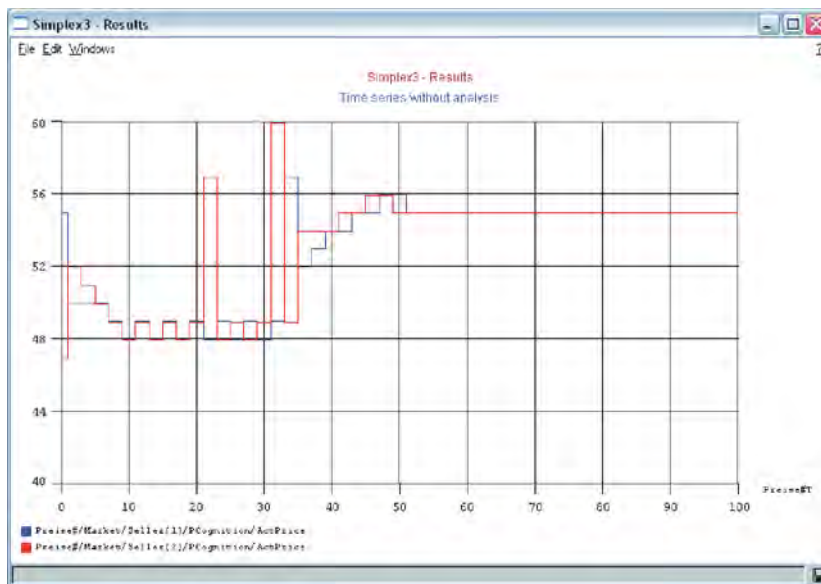


Рис. 2.22. Взаимодействие двух экспрессивных агентов при $ActPrice = \{55, 47 \text{ y.e.}\}$, $Criterion = \{150, 100\}$; $Person = \{nervous, nervous\}$

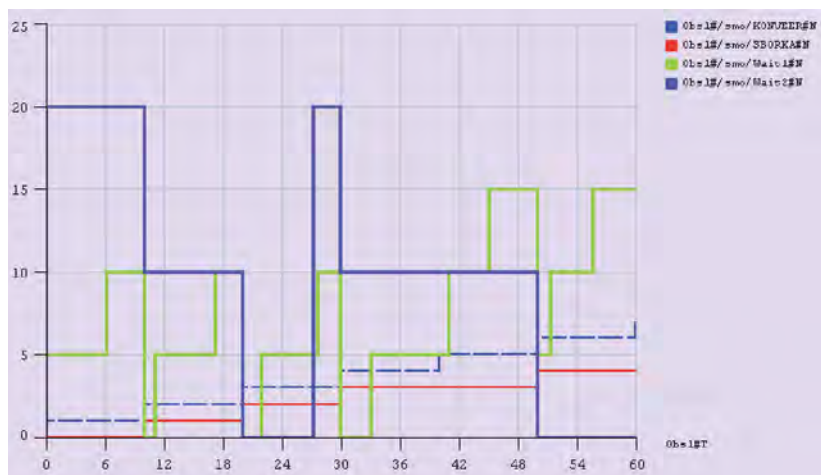


Рис. 4.2. График поступления деталей и заполнения секций на комплекточном конвейере

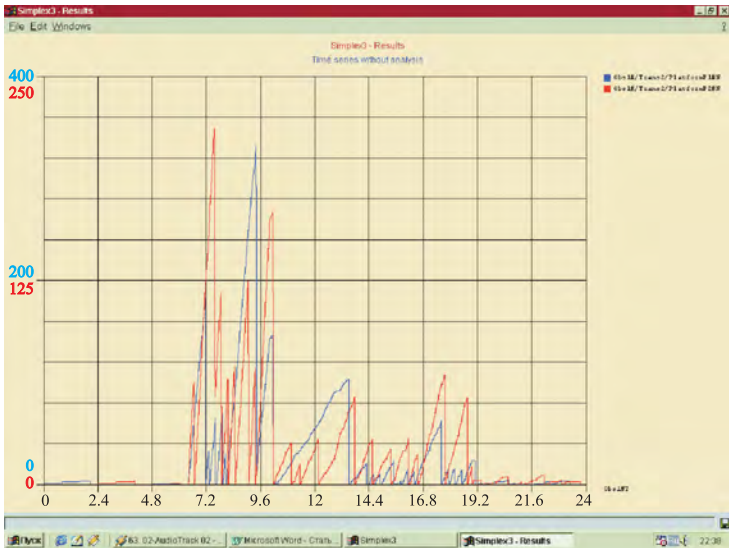


Рис. 4.5. Графики изменения числа пассажиров на 1-й (синяя линия) и 2-й (красная линия) платформах

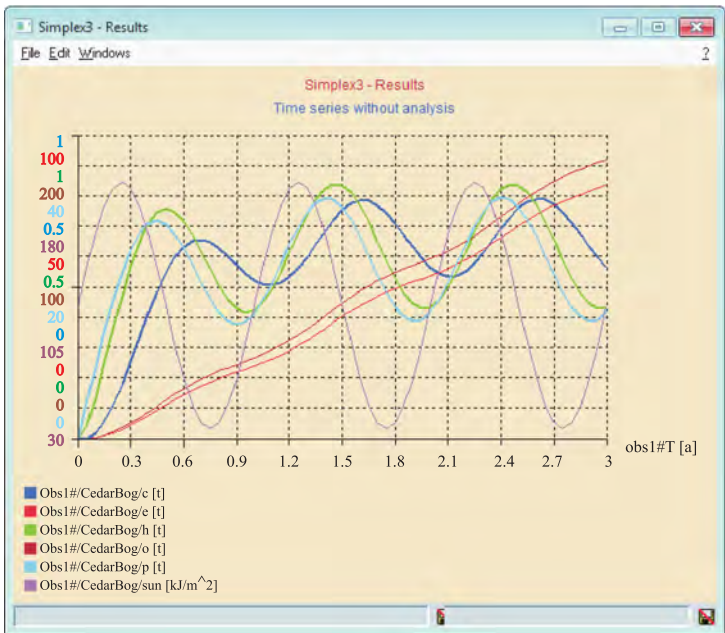


Рис. 5.3. Графики изменения переменных состояния мультиагентной модели CedarBog

[. . .]



Ивашкин Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор кафедры «Компьютерные технологии и системы» Московского государственного университета прикладной биотехнологии (МГУПБ), академик Международной академии информатизации и Международной академии системных исследований (МАСИ), председатель секции «Компьютерные системы в прикладной биотехнологии» МАСИ, член Национального общества имитационного моделирования.

Является автором 12 монографий, учебных пособий и более 200 научных публикаций в области системного анализа и принятия оптимальных решений на основе структурно-параметрического и мультиагентного моделирования больших систем.

Основные результаты научной деятельности связаны с разработками компьютерных технологий идентификации и прогнозирования ситуаций в автоматизированных системах обработки информации и управления, многокритериальной оптимизации биотехнологических систем, в том числе экспертной системы адекватного питания человека; агентных технологий и мультиагентных моделей маркетинговых, логистических, социальных и биологических активных систем.