

Пятая всероссийская научно-практическая конференция по
имитационному моделированию и его применению в науке
и промышленности

«ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»

ИММОД-2011

**Труды
конференции**



ТОМ I

Генеральный спонсор конференции
ООО «Экс Джей Текнолоджис»



www.anylogic.ru

Санкт-Петербург

2011

ISBN 978-5-905526-02-2

СОСТАВИТЕЛИ А. М. Плотников, Б. В. Соколов, М. А. Долматов

Компьютерная верстка Л. П. Козлова

Редактирование Е. П. Смирнова, Л. А. Яковлева

Уважаемые коллеги, дамы и господа!

Сегодня ОАО «Центр технологии и судостроения» и Институт информатики и автоматизации РАН проводят Пятую всероссийскую научно-практическую конференцию по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2011.

Тематика конференции посвящена всестороннему анализу современного состояния и перспектив развития теории и инструментальных средств имитационного моделирования производственных и технологических процессов, имитационному моделированию в транспорте и телекоммуникациях, в системах административного управления и САПР. Особую актуальность представляет рассмотрение задач имитационного моделирования в сфере анализа и синтеза бизнес-процессов.

На конференции широко представлены результаты исследований проблем оценивания качества моделей и распределенного моделирования, сведения о современных языках и программных системах, используемых при моделировании.

Помимо новых научных результатов, связанных с решением задач имитационного моделирования в различных предметных областях, в материалах конференции отражены опыт практического применения математического аппарата имитационного моделирования в конкретных программных системах и инструментальные средства автоматизации моделирования.

В рамках конференции нам предоставляется возможность обсудить с коллегами из разных городов и разных организаций последние достижения российской науки в области решения задач имитационного моделирования и применения их в научных исследованиях и в промышленности. Мы надеемся, что работа конференции будет способствовать укреплению сотрудничества отечественных партнеров, а также установлению новых научных и деловых связей.

Мы полагаем, что эта встреча будет для вас памятной и приятной, поскольку произойдет в Санкт-Петербурге, одном из красивейших городов мира, центре науки, высоких технологий и культуры.

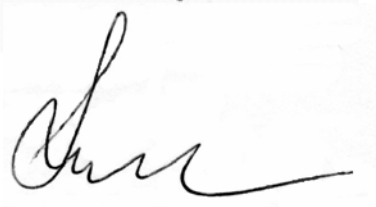
Успехов в работе всем участникам!

Генеральный директор
ОАО «ЦТСС»



В.Д.Горбач

Директор СПИИРАН



Р.М. Юсупов

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Пятой (юбилейной) всероссийской научно-практической конференции
по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности
«Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2011

Сопредседатели:

Горбач В.Д., генеральный директор ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта», д.т.н., академик МАИ (Санкт-Петербург)

Юсупов Р.М., директор СПИИРАН (Санкт-Петербург), член-корреспондент РАН, президент НП «Национальное общество имитационного моделирования», Заслуженный деятель науки и техники РФ

Заместители сопредседателей:

Плотников А.М., и.о. начальника отраслевого центра ИПИ-технологий судостроения, ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта» (Санкт-Петербург)

Ткач А.Ф., заместитель директора СПИИРАН (Санкт-Петербург), к.т.н., доцент

Члены оргкомитета:

Алиев Т.И., заведующий кафедрой ВТ, профессор, д.т.н., СПбГУИТМО (Санкт-Петербург)

Борщев А.В., генеральный директор ООО «Экс Джей Текнолоджис» (Санкт-Петербург), к.т.н.

Власов С.А., начальник Отдела нанотехнологий и информационных технологий – заместитель академика-секретаря Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН по научно-организационной работе, ведущий научный сотрудник ИПУ РАН (Москва), к.т.н.

Девятков В.В., директор ООО «Элина-Компьютер» (Казань), к.т.н.

Елтышев Б.К., начальник ВЦ, доцент, к.т.н., Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет (Санкт-Петербург)

Комок А.И., заместитель генерального директора по ВЭД – директор ВЭФ, ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта» (Санкт-Петербург)

Лычкина Н.Н., к.э.н., доцент, Государственный Университет Управления (Москва)

Томашевский В.Н., профессор, д.т.н., Национальный технический университет Украины «КПИ» (Киев, Украина)

Меркурьев Ю.Б., заведующий кафедрой Рижского ТУ, х.д.и.н., профессор, член-корреспондент Латвийской АН, президент Латвийского общества имитационного моделирования (Рига, Латвия)

Сениченков Ю.Б., д.т.н., профессор, СПбПУ (Санкт-Петербург)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Пятой (юбилейной) всероссийской научно-практической конференции
по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности
«Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2011

Сопредседатели:

Юсупов Р.М., директор СПИИРАН (Санкт-Петербург), член-корреспондент РАН, президент НП «Национальное общество имитационного моделирования», Заслуженный деятель науки и техники РФ

Горбач В.Д., генеральный директор ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта», д.т.н., академик МАИ (Санкт-Петербург)

Заместители сопредседателей:

Соколов Б.В., заместитель директора СПИИРАН (Санкт-Петербург) по научной работе, д.т.н., профессор

Хомоненко А.Д., заведующий кафедрой информационных и вычислительных систем ПГУПС (Санкт-Петербург), д.т.н., профессор

Члены программного комитета:

Алиев Т.И., заведующий кафедрой ВТ СПбГУИТМО (Санкт-Петербург), д.т.н., профессор

Верзилин Д.М., доцент СПИИРАН (Санкт-Петербург), д.э.н.

Вишнякова Л.В., ФГУП «ГосНИИ авиационных систем» (Москва), д.т.н., профессор

Девятков В.В., директор фирмы ООО «Элина-Компьютер» (Казань), к.т.н.

Карпов Ю.Г., СПбПУ (Санкт-Петербург), д.т.н., профессор (Санкт-Петербург)

Кобелев Н.Б., Всероссийский заочный финансово-экономический институт (Москва), д.э.н., профессор

Конюх В.Л., Новосибирский ГТУ (Новосибирск), д.т.н., профессор

Рыжиков Ю.И., Военно-космическая академия им. Можайского, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, ведущий научный сотрудник СПИИРАН (Санкт-Петербург)

Толуев Ю.И., руководитель проектов, Институт организации и автоматизации промышленного производства им. Фраунхофера IFF, доктор естественных наук, приват-доцент (Магдебург, Германия)

Яцкив И.В., проректор по учебной работе, профессор, к.т.н., Рижский институт транспорта и связи (Рига, Латвия)

Организаторы и учредители конференции:

ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта», Санкт-Петербург

Институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург

«Национальное общество имитационного моделирования», некоммерческое партнерство

Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН, Москва

Российский национальный комитет по индустриальной и прикладной математике

Информационная поддержка конференции

ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта», Санкт-Петербург

Институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург

«Национальное общество имитационного моделирования», некоммерческое партнерство

ООО «Элина-Компьютер», Казань

ООО «Экс Джей Текнолоджис» (XJ Technologies), Санкт-Петербург

журнал «Rational Enterprise Management», Санкт-Петербург

журнал «Судостроение», Санкт-Петербург

научно-практический журнал «Прикладная информатика», Москва

журнал «Автоматизация в промышленности», Москва

Генеральный спонсор конференции

ООО «Экс Джей Текнолоджис» (XJ Technologies), Санкт-Петербург

Спонсоры конференции

Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН, Москва

Российский фонд фундаментальных исследований, Москва

«Национальное общество имитационного моделирования», некоммерческое партнерство

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Аксенов К. А., Смолий Е. Ф.</i> Мультиагентное имитационное моделирование бизнес-процессов и организационно-технических систем, среда BPsim.....	11
<i>Борщев А. В.</i> Имитационное моделирование в транспорте, логистике и цепочках поставок	20
<i>Вишнякова Л. В., Дегтярев О. В., Слатин А. В.</i> Имитационное операционное моделирование процессов функционирования сложных авиационных систем и комплексов управления.....	30
<i>Власов С. А., Девятков В. В., Кобелев Н. Б.</i> Имитационные исследования: от классических технологий до облачных вычислений.....	42
<i>Плотников А. М., Рыжиков Ю. И., Соколов Б. В.</i> Современное состояние и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации	51
<i>Руховец Л. А.</i> Математические модели для решения задач сохранения водных ресурсов больших стратифицированных озер и их применение.....	62
<i>Сотников К. А., Ивановский Р. И., Беляев А. Н., Карпов Ю. Г.</i> Роль имитационного моделирования в задачах внедрения технологий Smart Grid.....	65
<i>Толуев Ю. И., Иванов Д. А.</i> Инженерные традиции в имитационном моделировании производственных и логистических систем	75

Секция 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО И КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

<i>Jurenoks V., Jansons V., Didenko K.</i> Imitation modelling and copula method using for investigation of economic problems in training process.....	83
<i>Алексеев А. В., Орлов К. М.</i> Полимодельная оценка качества и оптимизация сложных эрготехнических систем	89
<i>Алиев Т. И., Асафьев Г. К.</i> Проблема сочетания генераторов псевдослучайных величин в GPSS-моделях.....	95
<i>Барщевский Г. Е., Горячев А. А.</i> Синтез плана имитационного эксперимента для определения вероятностных характеристик показателей качества судовых автоматизированных систем	101
<i>Березовская Ю. В., Воробьев В. А.</i> Каузальное моделирование – метод имитационного моделирования сложных систем.....	105
<i>Боев В. Д.</i> Некоторые аспекты адекватности систем имитационного моделирования дискретно-событийных процессов.....	109
<i>Верзилин Д. Н., Потапычев С. Н., Рыжков Н. А.</i> Задачи имитационного моделирования в оценивании реакции социально-экономических систем на внешние воздействия	115
<i>Верхушин Д. И.</i> Методика имитационного моделирования и испытаний на помехоустойчивость устройств формирования и приема сигналов в цифровой связи.....	120
<i>Горохов А. В., Халиуллина Д. Н.</i> Имитационное моделирование развития научно-инновационного предприятия	124
<i>Гурьянов В. И.</i> Логический подход в методологии имитационного моделирования активных систем.....	129

Диденко Д. Г. Качество генерации псевдослучайных чисел в системах имитационного моделирования OpenGPSS, GPSS\World и AnyLogic	134
Долгушин Д. Ю., Задорожный В. Н., Кокорин С. В. Двухуровневое моделирование автотранспортных потоков на основе клеточных автоматов и систем с очередями	139
Емельянов А. А., Власова Е. А., Емельянова Н. З. Имитационное моделирование инвестиционных процессов	145
Ермаков С. А., Замятина Е. Б. Оптимизация распределенных алгоритмов имитационного моделирования	151
Задорожный В. Н., Кутузов О. И. Моделирование и расчет буферов фрактальных СМО	156
Киндинова В. В., Кузнецова Е. В. О методе построения имитационной модели на примере задачи исследования конкуренции двух фирм	162
Кириллов Н. П. Концептуальная модель процессов управления функциональными состояниями технических систем и возможности ее прикладного использования	168
Кобелев Н. Б. Управляющие имитационные модели больших систем	172
Ковтун Л. И., Шарков Н. А. Интеллектуальный интерпретатор критических событий и их последствий в корабельной АСУ на базе упреждающего имитационного моделирования и ситуационного анализа контролируемых процессов	181
Конюх В. Л. Валидация имитационной модели процесса транспортирования	189
Королев В. В. Применение имитационного моделирования в автоматизированных системах военного назначения	194
Малыханов А. А., Черненко В. Е. Метод идентификации параметров агентных моделей автотранспорта с использованием информации GPS-навигаторов	203
Муравьева-Витковская Л. А. Оценка характеристик приоритетной модели звена передачи данных мультисервисной компьютерной сети	207
Осипов А. Б. Система массового обслуживания с несколькими классами заявок и потерями на переключении канала	214
Осипов В. Ю. Моделирование морских транспортных систем на основе интеллектуальных геоинформационных систем	219
Павлов А. Н. Агрегативно-декомпозиционный подход к моделированию управляемой реконфигурации катастрофоустойчивой информационной системы (КАИС)	223
Паньковский И. Ю., Бобин А. В., Слатин А. В. Технология построения имитационной математической модели воспроизведения хода боевых действий	229
Перцев Н. В., Леоненко В. Н. Имитационное моделирование распространения ВИЧ-инфекции на основе стохастических рекуррентных уравнений	234
Песиков Э. Б. Аналитический инструментарий оценки и управления рисками виртуального предприятия на основе статистического моделирования	239
Разумов Д. А., Алёшин В. Д. Имитационное моделирование в жизненном цикле автоматизированных систем управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях	244
Рыжиков Ю. И. Техника моделирования многоканальных приоритетных систем	250
Савина А. Л. Математические аспекты построения агентной модели миграционных потоков	255

Савина О. А., Савина А. Л. Алгоритмические аспекты построения агентной модели миграционных потоков	260
Селиверстов С. А. Инвариантный статистический анализ работы систем управления транспортными процессами	265
Соколов Б. В., Иконникова А. В., Потрясаев С. А., Рагиня Э. А. Комбинированные алгоритмы оценивания устойчивости планов применения сложной технической системы	269
Соснин В. В. Дисциплины обслуживания с прерываниями, реализуемые стандартными средствами GPSS	275
Степанцов М. Е. Моделирование некоторых сценариев развития систем железных дорог России и Украины.....	282
Фридман А. Я., Фридман О. В. Имитационный подход к моделированию координации сложных динамических систем.....	286
Чадеев В. М., Аристова Н. И. Модели для имитационного моделирования реальной экономики	291
Чертовской В. Д. Имитация процесса планирования работы технологической линии производства	295
Чукин Д. Ю., Трегуб И. В. Имитация динамики цен биржевых инструментов с использованием модели случайного блуждания цен с устойчивыми шагами	301
Шоров А. В., Котенко И. В. Теоретико-множественное представление имитационных моделей инфраструктурных атак и механизмов защиты от них.....	306
Юдин Е. Б., Васильев Е. Р. Генерация графов соседства в среде распределенного агентного моделирования RepastHPC	311

Секция 2. СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Александров В. В. Единая облачная имитационная среда GPSS Cloud	315
Александров В. В., Александрова В. В., Зайцева А. А. Технология когнитивного имитационного программирования.....	320
Александров В. В., Сикачев В. Ю. Комплекс имитационного моделирования управляемого воздушного движения в аэродромном пространстве.....	326
Антоненко В. А., Волканов Д. Ю., Чистилинов М. В. Средство генерации кода имитационной модели, совместимой со стандартом HLA	331
Бабкин Е. А., Разиньков В. В. Среда имитационного событийного моделирования ...	336
Березнев Е. В., Григорьев Р. Н., Самойлов Д. В., Слатин А. В., Масленников А. А. Программное средство трехмерной визуализации результатов имитационного моделирования	341
Гарбарев А. Ю. Реализация системы агентного имитационного моделирования в WEB	346
Девятков В. В., Исаев Ф. В. Универсальный редактор форм для моделей на GPSS World	350
Девятков В. В., Федотов М. В. Расширенный редактор GPSS World	355
Жуков М. В., Золотухин В. В. Имитационное моделирование процесса функционирования системы спутниковой связи с целью анализа и оптимизации показателей надежности	360
Закиров В. И., Золотухин В. В. Исследование надежности беспроводных сетей связи методом имитационного моделирования в среде AnyLogic.....	365

Кринецкий Е. О., Шебеко Ю. А. Агентная парадигма компьютерной имитации в задачах моделирования поведения Grid-инфраструктур.....	370
Мишин Д. В. О применении среды моделирования AnyLogic в исследовании эффективности алгоритмов выбора администраторов корпоративной сети передачи данных.....	373
Морозов В. П. Средства автоматизации моделирования потоковых систем в среде MS Excel.....	378
Рудометов С. В. Создание системы имитационного моделирования технологических систем	383
Рыбаков В. Н., Кузьмичев В. С. Разработка виртуальной лаборатории испытаний ГТД.....	388
Рябинин К. В. Модуль трёхмерной визуализации для СИМ Triad.Net.....	393
Филь Ю. Ю., Михайлов В. В. Система предварительной обработки метеоданных.....	398
Хубаев Г. Н., Щербаков С. М. Автоматизированная генерация имитационных моделей на основе UML-диаграмм в системе СИМ-UML	404
Чемерицкий Е. В., Волканов Д. Ю., Смелянский Р. Л. Оценка применимости среды CERTI для моделирования РВС РВ.....	409
Черненко В. Е., Малыханов А. А. Библиотека для имитационного моделирования логистических сетей.....	414
Шпаков В. М. Ситуационный подход к реализации физических имитационных моделей динамических систем.....	419
Юдин Е. Б., Задорожный В. Н., Пендер Е. А. Случайные графы с нелинейным правилом предпочтительного связывания в системе агентного моделирования SIMBIGRAPH	425
Постников А. А., Крупский А. Ю., Девятков В. В. Методика оценки эффективности информационных систем (на примере информационных систем Рособнадзора).....	431
Рефераты	435
Abstract	444

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ И ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СРЕДА BPSIM*

К. А. Аксенов, Е. Ф. Смолий (Екатеринбург)

Работа посвящена актуальной проблеме разработки и внедрения теории, методов и средств динамического моделирования ситуаций (СДМС), позволяющих создавать адекватные модели динамических процессов преобразования ресурсов (бизнес-процессов (БП), производственных и организационно-технических систем (ОТС)) и получать на их основе эффективные управленческие решения, прогнозы последствий принятия решений, прогнозы развития предприятий. В работе также решаются задачи автоматизации технико-экономического проектирования (ТЭП) ОТС и проектирования эффективных информационных систем (ИС, программное обеспечение (ПО)) поддержки деятельности и принятия решений (ППР) с использованием полученных динамических моделей, т.е. задача создания CASE-средств, которые используются для настройки имитационных моделей и прикладных систем поддержки принятия решений.

Применение ситуационных моделей в управлении процессами способствует повышению эффективности и качества принимаемых решений, сокращению времени процесса принятия решений (ППР), более рациональному использованию имеющихся ресурсов. Создание СДМС является одним из перспективных направлений развития систем ППР. В настоящее время наблюдается существенный интерес к области мультиагентных систем, спецификой которых является наличие сообществ взаимодействующих агентов, отождествляющихся с лицами, принимающими решения (ЛПР).

Процессы преобразования ресурсов с точки зрения ОТС

Анализ различных процессов преобразования ресурсов позволяет выделить следующие их особенности:

1. Объекты ОТС характеризуются сложностью структуры и алгоритмов поведения, многопараметричностью, иерархичностью [1].
2. На самых нижних уровнях процесс может быть представлен с точностью до элементарных операций преобразования ресурсов [2].
3. Для систем такого типа характерно вероятностное поведение; высокая изменчивость источников и адресатов информации, номенклатуры и форм представления документов; недостаток квалифицированных специалистов в области информационных технологий [3]. Организационные задачи во многих случаях не имеют точных алгоритмов решения, а разрешаются в рамках некоторых сценариев, которые трудно описать алгоритмическими моделями; более адекватными оказываются модели представления знаний, позволяющие менять правила поведения и делать логические выводы на основании содержания базы знаний (БЗ) [3]. Отсюда вытекает потребность в интеллектуальной системе ППР, которая бы взяла на себя все формализованные функции исполнителей и оказала существенную поддержку при решении трудноформализуемых задач.

Состояние программного обеспечения СДМС и CASE-средств

При решении практических задач принятия решений, анализа бизнес-процессов, проектирования и разработки программного обеспечения с 1997 года был накоплен опыт работы со следующими инструментариями:

1. Экспертная система (ЭС) реального времени G2.
2. Системы имитационного моделирования Arena, AnyLogic, ARIS, iThink, GPSS, PowerSim, ReThink.

* Работа выполнена в рамках конкурса на проведение НИР программы развития УрФУ.

3. CASE-средства All Fusion, Rational Suite.

Анализ состояния в области СДМС [2] показывает, что в настоящее время не существует систем, ориентированных на процессы преобразования ресурсов. Ближайшими по функциональности аналогами являются средства имитационного (ИМ) и экспертного моделирования и, в частности, ЭС реального времени G2; универсальная система ИМ AnyLogic; средство моделирования БП ARIS. Был проведен сравнительный анализ данных систем на соответствие следующим требованиям: 1) проектирование концептуальной модели предметной области; 2) описание знаний о предметной области и вывод на знаниях; 3) описание динамических процессов преобразования ресурсов; 4) создание иерархической модели процесса; 5) наличие языков описания ситуаций, команд; 6) построение мультиагентных моделей (наличие сообществ интеллектуальных агентов (ИА), отождествляющихся с лицами, принимающими решения (ЛПР), обладающими моделью поведения и знаниями); 7) интеграция ИМ, ЭС и ситуационного управления (СУ); 8) интеграция с методикой сбалансированных показателей (Balanced ScoreCard (BSC)); 9) поддержка русского языка. Анализ показал, что ни одна из систем не обладает всеми функциями, необходимыми для мультиагентной СДМС. К достоинствам пакетов AnyLogic и G2 можно отнести использование языков высокого уровня, благодаря чему пакеты могут предоставлять разработчику моделей серьезный уровень функциональности.

Наиболее распространенными CASE-средствами проектирования ПО в настоящее время являются ARIS, All Fusion и Rational Rose. Основной недостаток данных систем – слабая связь (или ее отсутствие) с динамическими моделями, которые используются в ППР (часто следствием ППР является изменение процессов (оптимизация, реинжиниринг), что, в свою очередь, влечет за собой изменение инфраструктуры бизнеса). В области CASE-средств существуют лишь два комплекса программ, которые могут использовать в виде входной информации данные, полученные на этапе моделирования БП: 1) пакет ARIS, который предлагает меньшие возможности в области ИМ, но позволяет проектировать архитектуру ПО; 2) пакет AllFusion, который интегрируется со средством ИМ Arena. Лидер в области проектирования ПО Rational Rose не имеет средств интеграции с системами ИМ. Таким образом, задача проектирования ПО поддержки бизнеса на базе полученных динамических моделей является также актуальной, так как позволяет использовать полученные результаты на этапе моделирования в виде составляющих ПО в повседневной деятельности и ведет к сокращению сроков разработки и внедрения ИС. К недостаткам данных систем относятся: высокая стоимость, отсутствие поддержки русского языка и слабый уровень автоматизации работы аналитика и архитектора ПО.

Теоретические основы построения СДМС и интеллектуальных САПР

Математическим обеспечением СДМС выступают следующие методы: ИМ, ЭС, СУ, мультиагентное моделирование. Анализ существующего уровня CASE-средств позволяет сделать вывод, что наиболее развитые представители относятся к интеллектуальным САПР, так как программно реализуют семантические и метамодели проектирования ПО. При проектировании мультиагентного ПО такие CASE-средства состоят из следующих компонентов: онтология (БЗ) о предметной области, онтология о ПО, средства описания поведенческой модели и его динамического моделирования, графические средства проектирования и формирования элементов ПО.

Системный анализ мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР) и динамическая модель

При проведении системного анализа (СА) ОТС обычно описывают следующие составляющие: миссию, виденье, стратегии, процессы. Применение теории МППР позволяет по-новому взглянуть на ОТС с точки зрения динамических систем, основанных на знаниях.

Динамическая модель дискретного процесса преобразования ресурсов [4, 6] была разработана на основе следующих математических схем: сетей Петри, систем массового обслуживания, моделей системной динамики. В дальнейших исследованиях, данная модель была взята за основу и расширена ИА. В результате создания модели МППР [2] была решена задача интеграции ИМ, ЭС, ситуационного и мультиагентного моделирования.

Модель интеллектуального агента представлена в следующем виде:

$\text{Agent} = \langle \text{Name}, G\_Ag, \text{prior}, KB\_Ag, M\_In, M\_Out, SPA, \text{Control\_O}, AU, AD \rangle$,

где *Name* – имя агента; *G_Ag* – цели агента; *prior* – приоритет агента; *KB_Ag* – база знаний агента; *M_In* – количество входящих сообщений; *M_Out* – количество исходящих сообщений; *SPA* – сценарии поведения; *Control_O* – множество управляемых объектов процесса преобразования ресурсов; *AU* – множество агентов «начальников»; *AD* – множество агентов подчиненных.

Агенты управляют объектами процесса преобразования. Агент выполняет следующие действия (рис.2): 1) анализирует внешние параметры (текущую ситуацию); 2) диагностирует ситуацию, обращается к БЗ. В случае определения соответствующей ситуации агент пытается найти решение (сценарий действий) в БЗ или выработать его самостоятельно; 3) вырабатывает (принимает) решение; 4) определяет (переопределяет) цели; 5) контролирует достижение целей; 6) делегирует цели своим и чужим объектам процесса преобразования, а также другим агентам; 7) обменивается сообщениями.

Для построения ядра моделирующей системы был использован аппарат продукционных систем. Определена структура продукционной системы МППР в виде:

$PS = \langle Rps, Bps, Ips \rangle$,

где $Rps = \{RES(t)\} \cup \{MECH(t)\} \cup \{U(t)\} \cup \{G(t)\}$ – текущее состояние ресурсов, средств, команд управления, целей (рабочая память); *Bps* – множество правил преобразования ресурсов и действий агентов (база знаний); *Ips* – машина вывода, состоящая из планировщика и машины логического вывода по базе знаний (БЗ) агентов.

Алгоритм имитатора состоит из следующих основных этапов: определения текущего момента времени $SysTime = \min(T_j)$, $j \in RULE$; обработки действий агентов; формирования очереди правил преобразования; выполнения правил преобразования и изменения состояния рабочей памяти. Для диагностирования ситуаций и выработки команд управления имитатор обращается к модулю ЭС.

Для описания иерархической структуры МППР были использованы системные графы высокого уровня интеграции и объектно-структурный подход к построению моделей ОТС Гавриловой Т.А. [5]. В качестве средства формализации знаний МППР используется подход на основе фрейм-концептов и концептуальных графов, предложенный Швецовым А.Н. [3].

Архитектура мультиагентной системы процессов преобразования ресурсов

За основу архитектуры агента МППР [7] взята InteRRap-архитектура [8] (как наиболее соответствующая предметной области) – множество вертикально упорядоченных уровней, связанных через общую структуру управления и использующих общую базу знаний. Архитектура состоит из блоков: интерфейса с внешним миром, реактивной подсистемы, планирующей подсистемы, подсистемы кооперации с другими агентами и иерархической базы знаний. Интерфейс с внешним миром определяет возможности агента по восприятию объектов или событий внешнего мира, воздействия на него и средства коммуникации. Реактивная подсистема использует базовые возможно-

сти агента по реактивному поведению, а также частично использует знания агента процедурного характера. Она базируется на понятии “фрагмента поведения” как некоторой заготовки реакции агента на некоторые стандартные ситуации. Компонент, ответственный за планирование, содержит механизм планирования, позволяющий строить локальные планы агента (планы, не связанные с кооперативным поведением). Компонент, ответственный за кооперацию агентов, участвует в конструировании планов совместного поведения агентов для достижения некоторых общих целей или выполнения своих обязательств перед другими агентами, а также выполнения соглашений.

Программное обеспечение семейства BPsim

Для решения задач моделирования, поддержки принятия решений, автоматизации ТЭП МСС и проектирования ИС была разработана линейка проблемно-ориентированных пакетов семейства BPsim (www.bpsim.ru):

1. BPsim.MAS – мультиагентная СДМС;
2. BPsim.DSS – интеллектуальная система принятия решений и ТЭП;
3. BPsim.SD – CASE-средство.

СДМС BPsim.MAS [2, 6] (до 2007 года название BPsim2) предназначена для решения задач динамического интеллектуального моделирования МППР (производственных и бизнес-процессов, организационно-технических систем). Система BPsim.MAS предназначена в целом для решения задач системного анализа (обследования), разработки моделей производственных и бизнес-систем, анализа узких мест, реинжиниринга. Применение математических моделей мультиагентных процессов преобразования ресурсов позволяет на новом уровне генерировать и анализировать возможные прогнозы принятия решений. Удобный графический интерфейс позволяет решать задачи бизнес-моделирования непрограммирующему пользователю.

СДМС BPsim.MAS обеспечивает выполнение следующих функций: проектирование концептуальной модели предметной области; создание динамической модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов; динамическое моделирование (рис. 1); анализ результатов экспериментов; получение отчетов по моделям и результатам экспериментов; экспорт результатов экспериментов в MS Excel и MS Project.

CASE-средство BPsim.SD [9] обеспечивает выполнение следующих функций:

- описание процессов предметной области в виде диаграмм DFD, прецедентов, последовательности, графической нотации мультиагентного процесса преобразования ресурсов;
- формализация процессов проектирования информационных систем с использованием расширенных диаграмм языка Unified Modeling Language (UML);
- создание диаграммы классов и сопоставление объектов диаграммы последовательности (кроме границ) с классами этой диаграммы;
- генерация кода на языке Object Pascal (Delphi);
- проектирование пользовательского интерфейса информационной системы;
- проектирование программного обеспечения в диалоговом режиме (используется аппарат диалоговых экспертных систем);
- конвертация имитационной модели МППР в модель ИС;
- визуальный проблемно-ориентированный графический интерфейс и реализованные алгоритмы позволяют существенно облегчить труд аналитика и/или архитектора программного обеспечения, что существенно позволяет ускорить процесс проектирования.

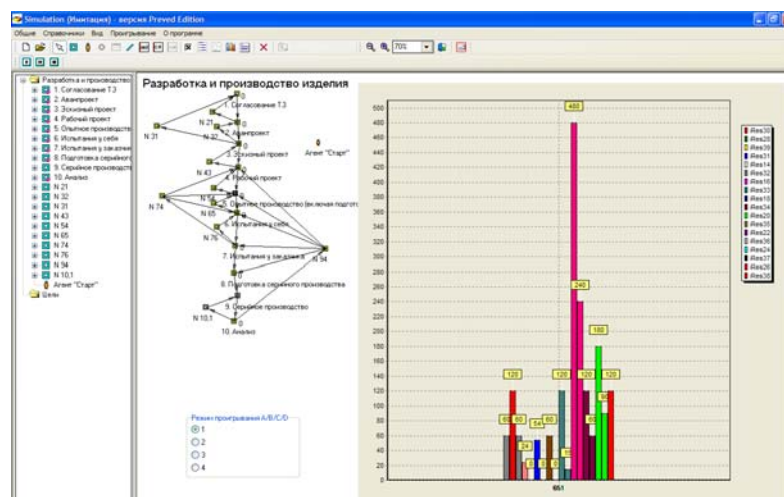


Рис. 1. СДМС BPsim.MAS

СППР BPsim.DSS (рис. 1) изначально создавалась как система технико-экономического проектирования мультисервисных сетей связи BPsim.MSN (BPsim3) [10], которая впоследствии была интегрирована с СДМС BPsim.MAS и расширена архитектурой InteRRap [7]. BPsim.DSS обеспечивает выполнение следующих функций:

- системный анализ предметной области;
- проектирование концептуальной модели предметной области (рис. 2);

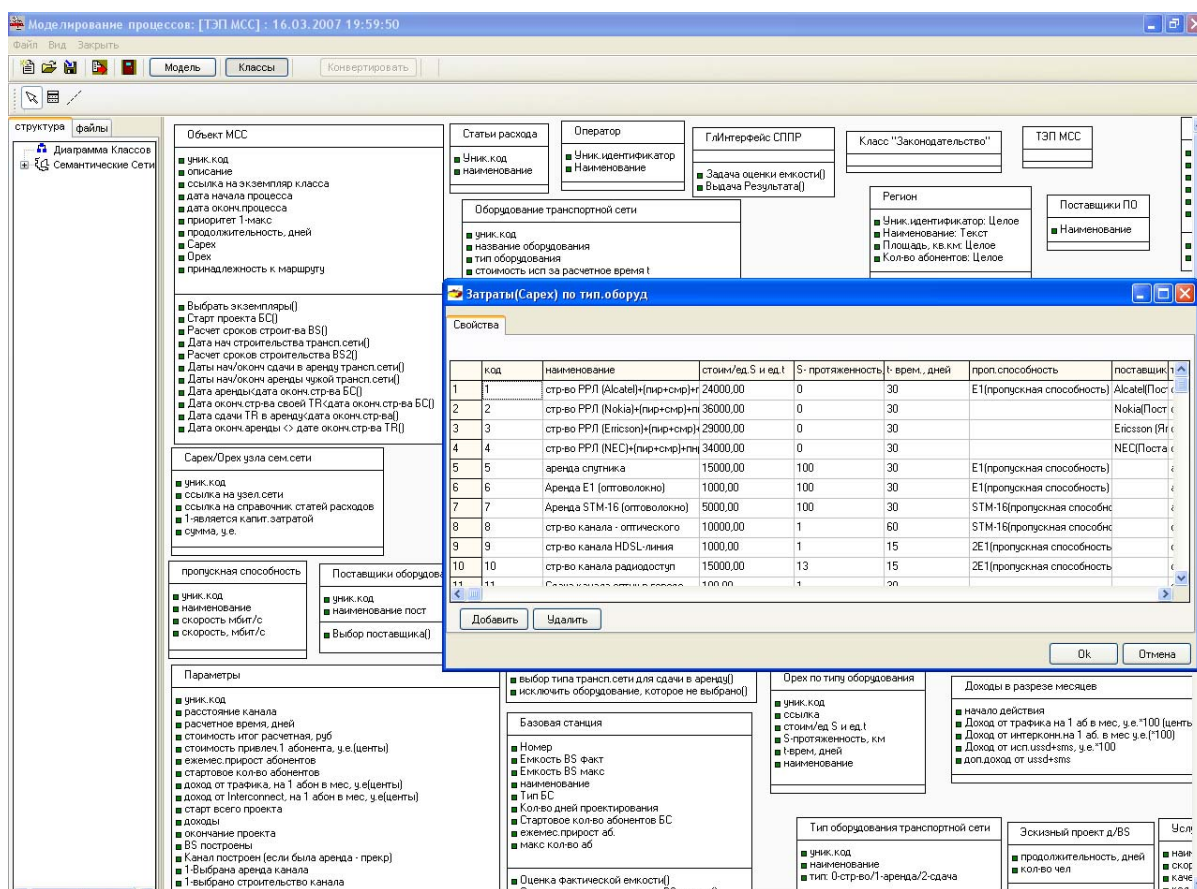


Рис. 2. Диаграмма классов и наполнение БЗ экземплярами в BPsim.DSS

- экспертное технико-экономическое проектирование (рис. 3);
- имитационное моделирование;

- анализ результатов экспериментов;
- получение отчетов по моделям и результатам экспериментов (формирование бизнес-кейса и диаграмм Ганта);
- экспорт результатов экспериментов в MS Excel и MS Project.

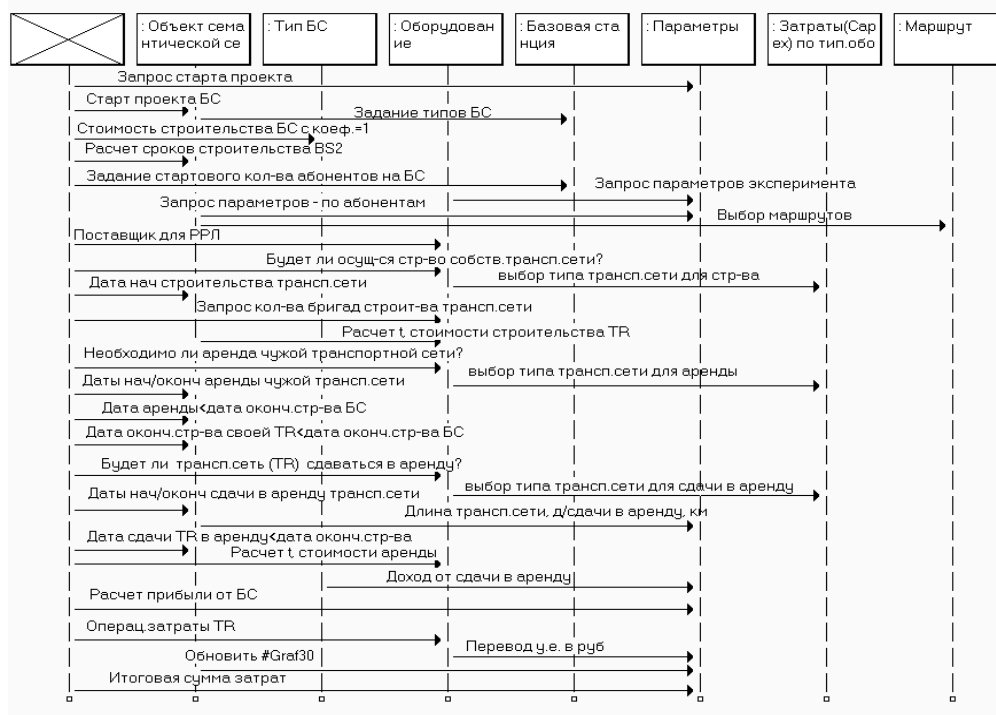


Рис. 3. Диаграмма «поиска решения» для задачи ТЭП мультисервисной сети связи

Использование различных инструментарием и методов на различных этапах анализа и синтеза мультиагентных процессов преобразования ресурсов и их поддержка линейкой продуктов BPsim показано в таблице.

№ п.п.	Этап	Инструментарий	Поддержка продуктами BPsim
1.	Описание процессов	Нотация IDEF0	SD, DSS
		Нотация DFD	SD, DSS
		Диаграмма прецедентов UML	SD, DSS
		Нотация МППР	MAS
2.	Проектирование программного обеспечения	Диаграммы DFD, прецедентов, классов, последовательности, проектирование и настройка прикладных СППР на основе среды BPsim	SD, DSS
		Семантические сети	DSS
		Фреймы	DSS
3.	Формализация знаний	Продукции	MAS
		Имитационное моделирование (дискретно-событийное)	MAS
		Мультиагентное моделирование	MAS
4.	Поддержка принятия решений	Ситуационное управление	MAS, DSS
		Диалоговые ЭС	DSS
		Гибридные модели	MAS, SD, DSS

Классификация агентов процессов преобразования ресурсов

На основе архитектуры гибридного агента МППР можно создавать следующие виды агентов, для решения различных прикладных задач:

✓ **реактивные агенты**, поведение которых определяется реактивной подсистемой и описывается только диаграммой деятельности (конечным автоматом). Данный вид агентов используется для задач динамического моделирования МППР;

✓ **реактивно-интеллектуальные агенты**, поведение которых определяется реактивной подсистемой и описывается только продукционной базой знаний (тактической). Данный вид агентов используется для задач динамического моделирования МППР, описания моделей ЛПР, управляющих процессами. Модели с такими агентами применялись в задачах моделирования производственных и бизнес-процессов, разработки маркетинговой стратегии (рис. 4–5), управления портфелем проектов, задач логистики и управления строительными работами [11–13]¹;

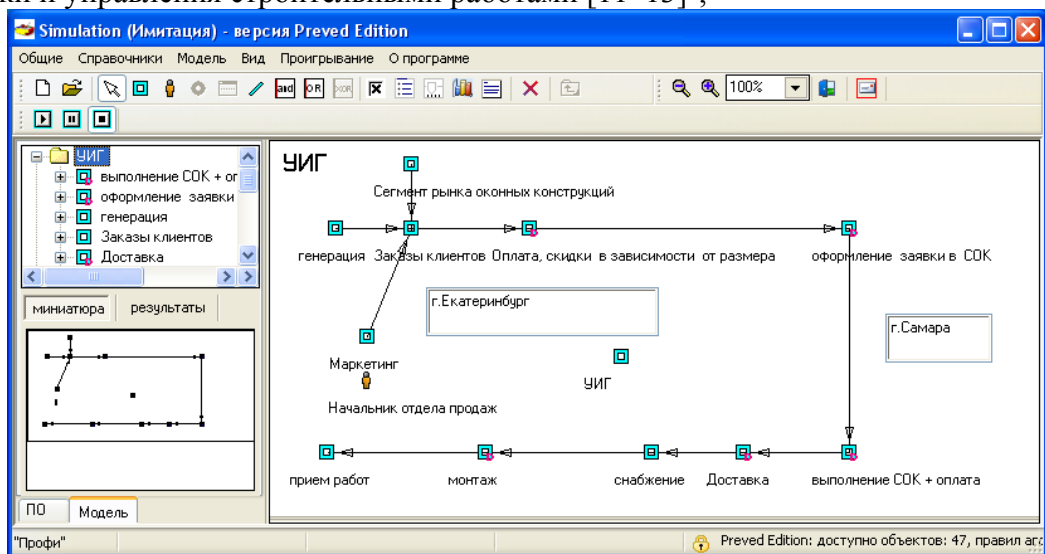


Рис. 4. Основной процесс ЗАО «УИГ»

№	ИМЯ СИТУАЦИИ	IF	THEN	ТЕКСТОВОЕ ОПИСАНИЕ
1	реакция 1 раз в 5 дней	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes105:=fRes104)&(fRes68:=	реакция 1 раз в 5 дней
2	1/действ.цена находится в окр. Цmin.	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes104:=max(fRes55,fRes66	Действующая цена наход
3	2/действ.цена находится в окр. Цmin.	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes104:=1,01*fRes104)	Действующая цена наход
4	3/действ.цена находится вне окр. Цmin.	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes104:=fRes104)	Действ. цена находится в
5	4/действ. цена находится вне окр. Цmin.	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes104:=max(fRes55,fRes66	Действ. цена находится в
6	5/действ. цена находится вне окр. Цmin.	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes104:=1,01*fRes104)	Действ. цена находится в
7	6/действ.цена вне окр., уменьшение цены	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes104:=0,99*fRes104)	Действующая цена наход
8	7/действ.цена нах. вне окр.Цmin. Уменьш	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes104:=min(fRes55,fRes66	Действующая цена наход
9	вычислим Dцены - изменение цены в про	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes68:=0-((fRes105-fRes104	вычислим Dцены - измене
10	выч. Dкд при (Dцены<-30)	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes73:=70)	сначала Dкд
11	выч. Dкд при Dцены [-30, -25]	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes73:=50)	
12	выч. Dкд при Dцены [-25, -20]	((t>0)&((t\$Res119)=	(fRes73:=32)	

Рис. 5. База знаний агента-конкурента

¹ См. также доклад «Разработка и применение системы поддержки принятия решений в управлении строительством», т. 2, с.

✓ **интеллектуальные агенты**, поведение и логика работы которых определяется только планирующей подсистемой и знания хранятся в фреймовой базе знаний (стратегической). Данный вид агентов используется для построения проблемно-ориентированных интеллектуальных систем на основе аппарата фреймовых экспертных систем (задачи диагностики, проектирования, построения советующих ЭС и систем технико-экономического проектирования). Модели с такими агентами применялись при решении задач технико-экономического проектирования мультисервисных сетей связи (МСС), проектировании информационных систем [9–10];

✓ **гибридные агенты**, полностью реализующие функциональность архитектуры гибридного агента МППР. Данный вид агентов используется для построения сложных интеллектуальных систем управления и планирования, контур которых состоит из двух элементов: 1) динамической модели процесса управления и 2) блока (модуля), реализующего поиск решения многопараметрической задачи и выработки (генерации) управляющего воздействия на модель процесса управления. Основы такой модели изложены на примере решения задачи планирования развоза топлива по сети автозаправочных станций².

Практические результаты применения теории, моделей и средств на предприятиях

СДМС BPsim.MAS внедрена и применялась при решении практических задач в ЗАО «Уральская индустриальная группа» (ЗАО «УИГ»), в ЗАО «Ведение реестров компаний», в ЗАО «ТелеСистемы». Так, внедрение в ЗАО «УИГ» позволило определить ценовую стратегию, следуя которой можно увеличить в течение года долю рынка с 6,6% до 20–22%. Интеллектуальная система BPsim.MSS применяется для решения задач ТЭП и бизнес-моделирования МСС в ООО «Инсталсайт-Урал». CASE-средство используется при разработке и проектировании информационных систем и настройки прикладных СППР, реализованных на основе среды BPsim.

Заключение

Полученные решения положены в основу подходов системного анализа и синтеза, проектирования и динамического моделирования МППР, а также технико-экономического проектирования, поддержки бизнеса и принятия решений.

Данные подходы реализуются в специализированных пакетах семейства BPsim www.bpsim.ru, обеспечивающих комплексную поддержку: диалогового создания структурной модели процесса преобразования и формализации модели конкретной предметной области; построения динамической модели; проведения имитационных экспериментов с их последующим анализом; выработки эффективных управленческих решений на предприятиях; технико-экономического проектирования мультисервисных сетей связи; проектирование ПО поддержки бизнеса и принятия решений.

Литература

1. **Советов Б. Я., Яковлев С. А.** Моделирование систем: учеб. для вузов. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
2. **Аксенов К. А., Гончарова Н. В.** Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 311 с.

² «Гибридная система поддержки принятия решений для планирования перевозок сети автозаправочных станций», т. 2.

3. **Швецов А. Н.** Модели и методы построения корпоративных интеллектуальных систем поддержки принятия решений: дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01 / А.Н. Швецов. СПб., 2004. 461 с.
4. **Аксенов К. А., Клебанов Б. И.** Принципы построения системы имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов BPsim ресурсов // Материалы I Всероссийской научн.-практ. конф. «ИММОД». СПб.: ФГУП ЦНИИТС, 2003. Т. 1. С. 36–40.
5. **Частиков А. П., Гаврилова Т. А., Белов Д. Л.** Разработка экспертных систем. Среда CLIPS. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 608 с.
6. **Аксенов К. А.** Модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов и системный анализ организационно-технических систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. Москва. 2009. № 6. С. 38–45.
7. **Аксенов К. А., Шолина И. И., Сафрыгина Е. М.** Разработка и применение объектно-ориентированной системы моделирования и принятия решений для мультиагентных процессов преобразования ресурсов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. № 80. С. 87–97.
8. **Muller Jorg P., Pischel Markus.** INTEgration of Reactive behavior and RAtional Planning, 1993.
9. **Аксенов К. А., Спицина И. А.** Метод проектирования информационных систем предприятия на основе семантических моделей мультиагентного процесса преобразования ресурсов и программного обеспечения // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 9. С. 22–30.
10. **Аксенов К. А., Попов М. В., Смолий Е. Ф., Доросинский Л. Г.** Динамическая система моделирования и проектирования мультисервисных сетей связи «BPsim3» // Материалы III Всероссийской научн.-практ. конф. «ИММОД-2007». СПб.: ЦНИИТС, 2007. Т. 1. С. 253–257.
11. Выбор ценовой стратегии предприятия с использованием мультиагентного подхода / **К. А. Аксенов, Н. В. Гончарова, Е. Ф. Смолий, С. Ю. Долматов, О. П. Аксенова** // Вестник УГТУ-УПИ. Сер. Экономика и управление. 2009. № 5. Екатеринбург. С. 108–116.
12. **Аксенов К. А., Антонова А. С.** Применение имитационного моделирования и технологии интеллектуальных агентов для решения задачи управления проектами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. (в печати).
13. **Попов А. В., Аксенов К. А., Бубенщикова А. А.** Использование численных методов оптимизации и систем массового обслуживания при моделировании процессов логистики // Имитационное моделирование. Теория и практика: Материалы IV Всероссийской научн.-практ. конф. «ИММОД-2007». СПб.: ЦНИИТС, 2009. Т. 1. С. 166–170.



Имитационное Моделирование в Транспорте, Логистике и Цепочках Поставок

Андрей Борщев
ООО "XJ Technologies"



© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

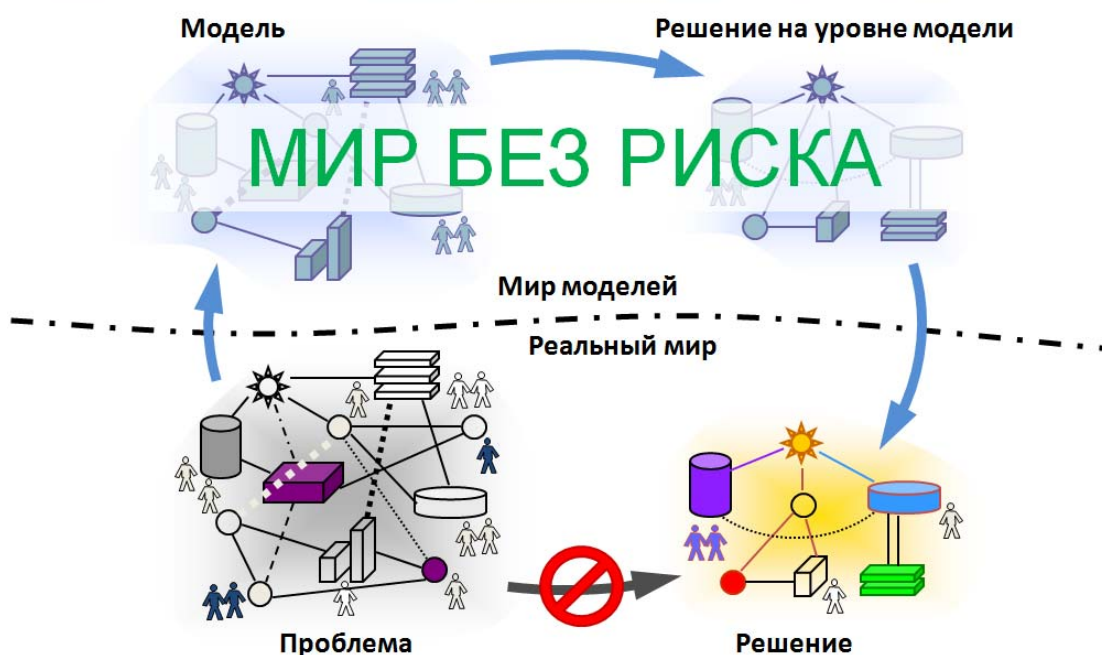
Об XJ Technologies / AnyLogic

- Инструмент ИМ AnyLogic (70-80% выручки)
 - Лидирующие позиции в бизнес-моделировании
 - Единственный коммерческий инструмент агентного моделирования, а также многоподходного моделирования
 - Растущая доля рынка:
 - Миграция с других инструментов
 - Новые области применения (где традиционные подходы не работают)
- Консалтинг (20-30% выручки)
 - Международный: сложные задачи, требующие нетрадиционных подходов, например:
 - Цепочки поставок + потребители + конкуренция
 - IT-инфраструктура + бизнес-процессы + рыночные стратегии
 - Россия: абсолютный лидер в любых приложениях ИМ

© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

2

Моделирование

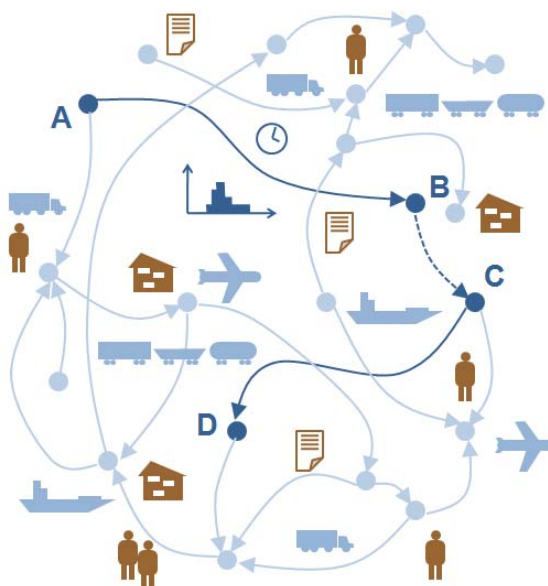


© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

3

Наша тема сегодня: из пункта А в пункт В

- Пространство
- Время
- Неопределённость
 - Время доставки
 - Отказы/поломки
- Причинность
- Большое количество объектов, параметров, степеней свободы
 - Когда, где
 - Авто/Поезд/Вода
 - Свой парк/Аренда
- Взаимодействие с другими процессами
 - Продажи/прогноз
 - Бизнес-процессы
 - Производство



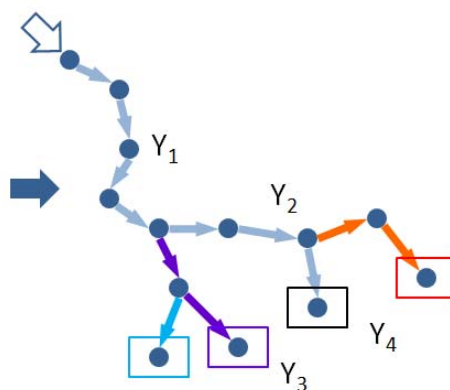
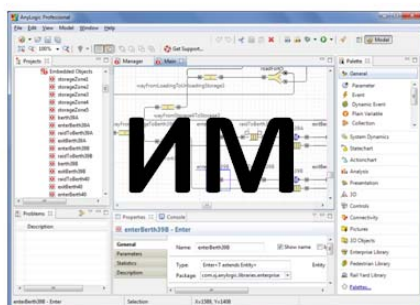
© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

4

...приходится строить имитационную модель

- Это “выполняемая” модель
 - Набор правил, позволяющих строить состояние системы в следующий момент времени из текущего
- Модель строит траекторию системы во времени
 - Выходы “наблюдаются” по мере продвижения

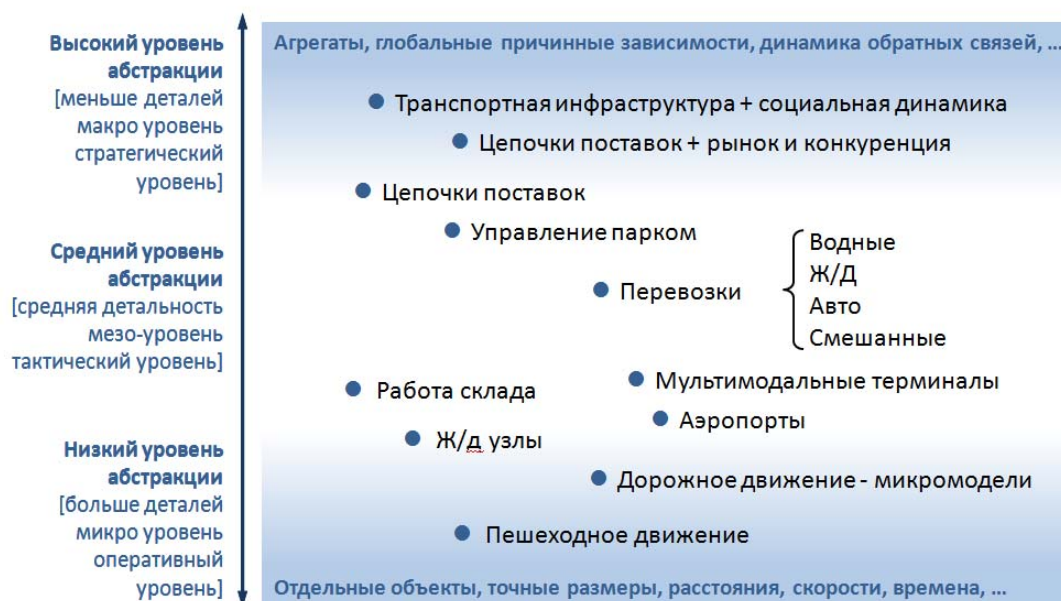
Входы

 X_1
 X_2
 X_3
 X_4


© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

5

Имитация в транспорте/логистике/ЦП



© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

6

EUROSTAR

- Background
 - Скоростной поезд соединяет Лондон с Парижем и Брюсселем. Поезд проходит через туннель под Ла-Маншем
 - Парижский терминал EUROSTAR расположен на Северном вокзале (Gare du Nord)
- Цель
 - Сколько поездов может обслужить терминал в час пик (в частности, могут ли два поезда отправиться с интервалом в 3-4 минуты?)
 - Оптимизация количества пунктов контроля и их распределение по типам пассажиров
 - Оптимизация политик управления очередями

© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

7

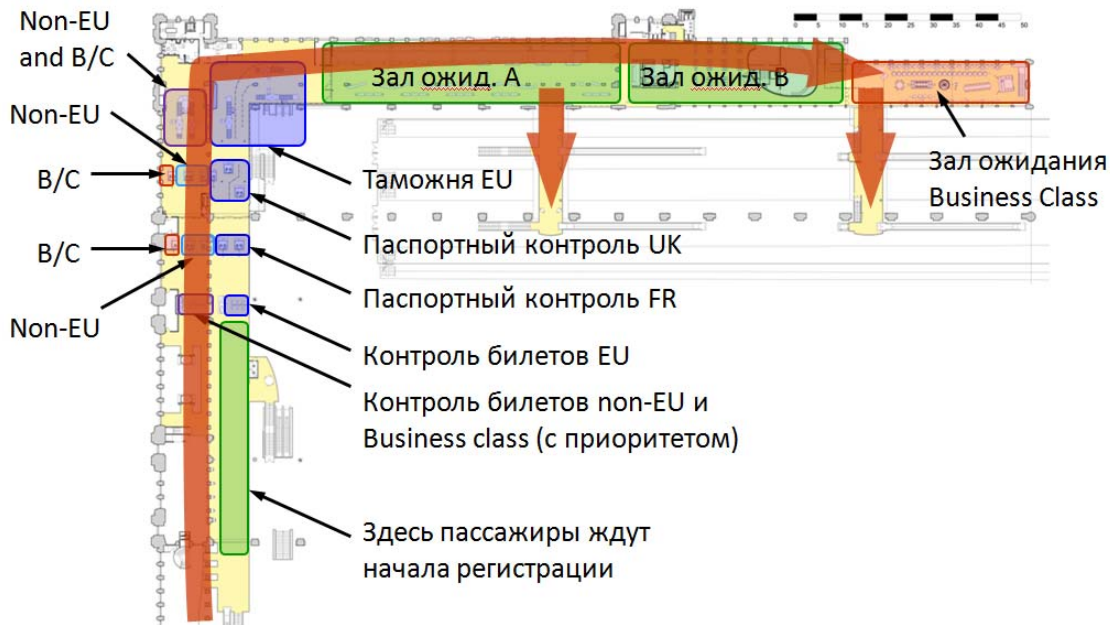
Исходные данные и результаты



© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

8

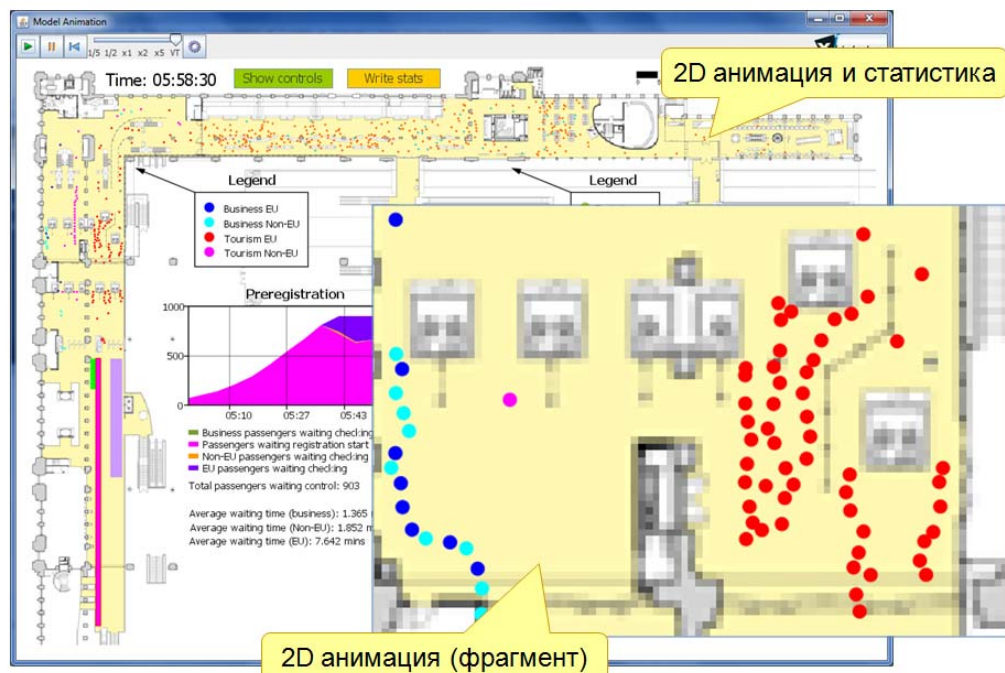
План терминала и процесс прохождения



© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

9

Demo...



© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

10

Распределительный центр Шолохово (X5)

- Background
 - X5 Retail Group – крупнейший розничная компания России Russia с мультиформатным подходом: 2910 дискаунтеров, 326 супермаркетов и 68 гипермаркетов
 - Распределительный центр Шолохово площадью 20,000 m²
 - первый с сети новых высокотехнологичных распределительных центров, будет использован как модель конфигурации, процессов, персонала
- Цель:
 - Многокритериальная оптимизация: максимизировать выполнение заказов, минимизировать операционные расходы (= цена за паллету). Найти оптимальное количество персонала и оборудования

© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

11

Model I/O

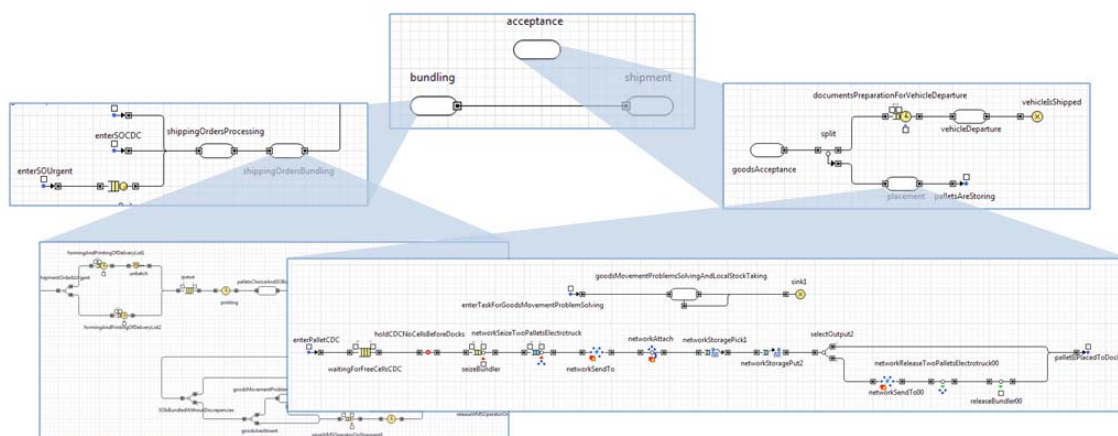


© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

12

Модель

- Иерархическая объектно-ориентированная модель с 34 объектами, представляющими процессы и подпроцессы
 - Некоторые процессы – в физическом пространстве
 - Некоторые – чисто логические (документооборот)



© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

13

Demo...

Входные данные в Excel

Склад моделируется как 34 процесса

Анимация

Результаты

Должность	Занято: всего	Средняя занятость
Стан. менеджер	3/3	64%
Менеджер по приему	1/1	13%
Приемщик	6/6	37%
Специалист по сопроводению	1/1	98%
Менеджер по качеству	1/1	
Менеджер по отпуску	1/1	
Контролер по отпуску	6/6	
Бухгалтер (приемная)	2/2	12%
Бухгалтер (отпуск)	3/3	12%
оператор (завед. БК-сет (приемная))	1/1	11%
оператор (ММБ) БК-сет (отпуск)	3/3	14%
Контролер службы безопасности	9/9	36%
Контролер Отдела контроля заказов	5/5	59%
Компьютеризация	36/36	97%
Водитель (эксплуатационная)	11/11	52%
Группа	15/15	14%

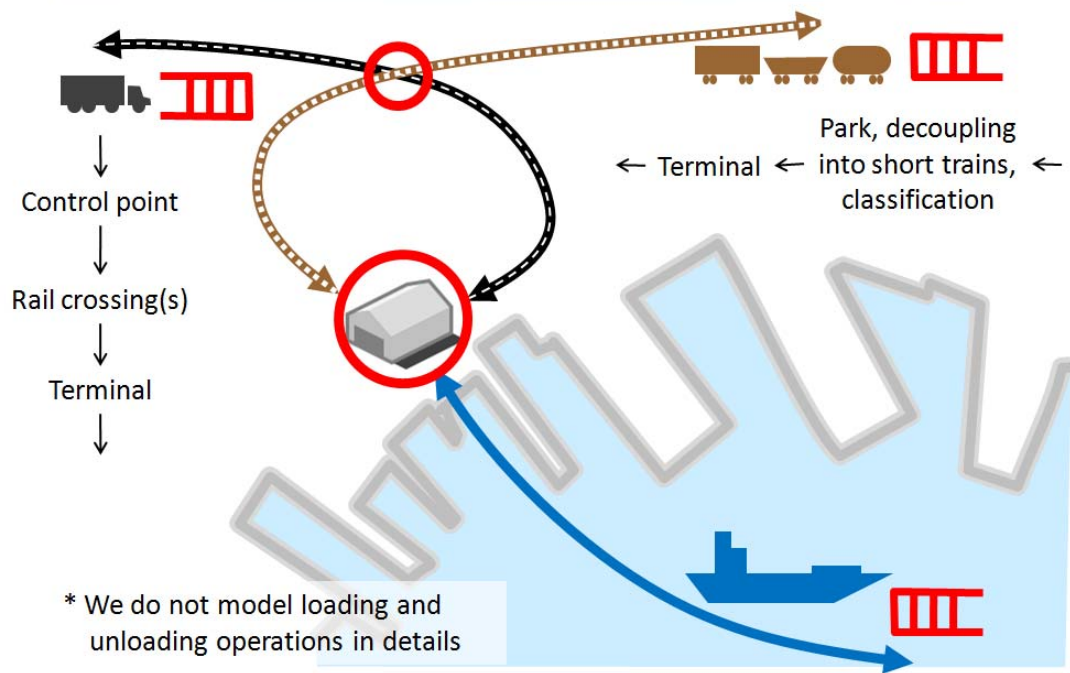
Novorossiysk Transport Junction

- Background
 - A multi-purpose, year-round, deep-water port located on the Russian shore of the Black Sea
 - Russia's largest commercial sea port handling approximately 20% of Russia's exports and imports shipped via sea
 - All types of cargo: liquid, dry bulk, containers, general
 - Port, pipeline, rail, road and warehouse infrastructure
- Goal:
 - Find out how well the port can handle the growing cargo turnover (estimated for 2015, 2020, 2025)

© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

15

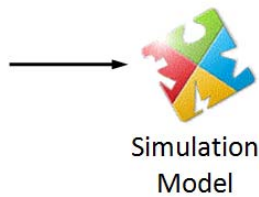
We model: ships, storages, trucks and trains*



© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

Model I/O

- Port map with terminals, storages, roads and rails
- Passenger train timetable
- Background traffic
- Storages working hours
- Weather conditions
- Truck and train speeds
- Truck control delay distributions
- Types and amount of cargo



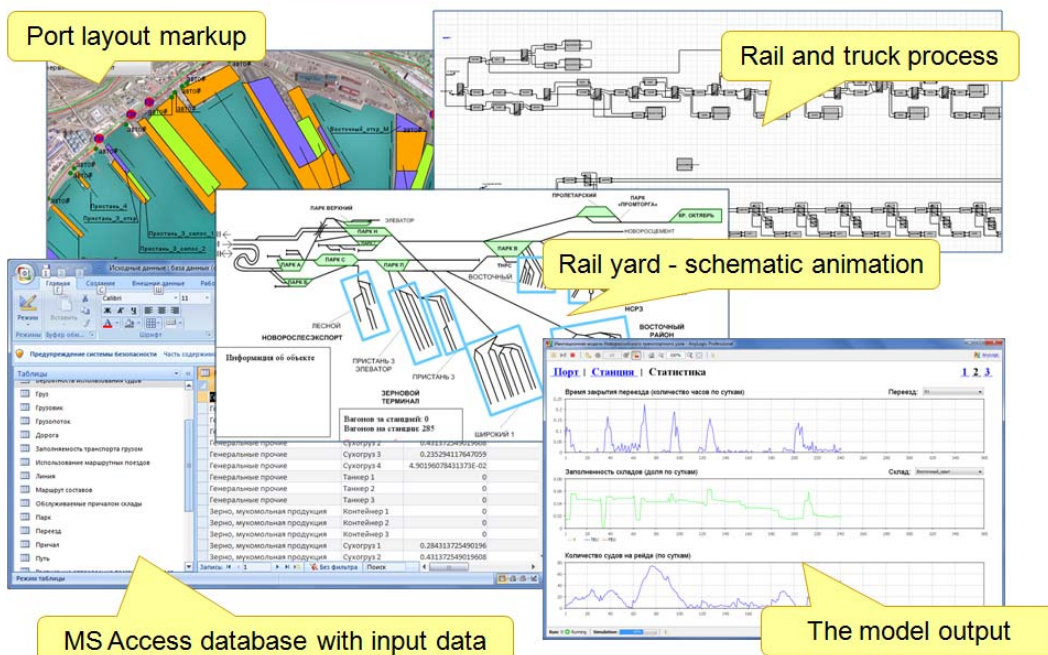
- Truck and rail car turnover
- Truck queue lengths and waiting times
- Rail crossing closing time percentage
- Storage utilization
- Ships waiting to enter the port

DE Discrete Event model

© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

17

Demo...



© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

18

Как используются имитационные модели?

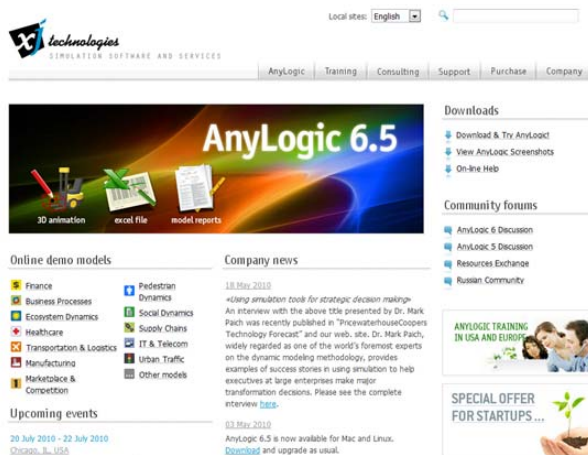
- Встроены в процесс оперативного управления
 - Модель полностью встроена в процесс производства, логистики, бизнес-процесс, запускается автоматически, может быть “не видна” явно
- Запускаются периодически при принятии решений
 - Модель запускается вручную, скажем, при планировании на квартал
- Оценка и сравнение сценариев планируемых изменений
 - Модель – инструмент планирования модернизации, оценки новых проектов, оптимизации будущей стратегии
- Для анимации / демонстрации предлагаемого проекта
 - Иллюстрирует работу объекта, который предлагается создать, используется как дополнительный аргумент в пользу данного решения
- Для тренировки и обучения
 - Позволяет персоналу лучше понять работу системы, обучиться принятию решений. Часть используется для “управленческих игр”

© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

19

Спасибо!

- Вопросы?
- Как нас найти: www.AnyLogic.com



© 2011 XJ Technologies, www.anylogic.com

20

ИМИТАЦИОННОЕ ОПЕРАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ УПРАВЛЕНИЯ

Л. В.Вишнякова, О. В.Дегтярев, А. В. Слатин (Москва)

Введение

Имитационные модели являются частным случаем математических моделей. Под термином «имитационная модель» подразумевают «вычисление значений некоторых характеристик развивающегося во времени процесса путем воспроизведения течения этого процесса на компьютере с помощью его математической модели, причем получить требуемые результаты другими способами или невозможно, или крайне затруднительно» [6].

В Государственном научном центре «ГосНИИ авиационных систем» имеется многолетний опыт имитационного моделирования систем управления оружием, а также операционного моделирования боевых операций. Создана система математических имитационных моделей, разработаны методики, связанные с применением этих моделей на различных этапах исследований и различных фазах жизненного цикла систем. Этот опыт был распространен на задачи исследования использования воздушного пространства в интересах гражданского заказчика – отечественных служб системы организации воздушного движения.

С одной стороны, эти два направления отличаются друг от друга: различные показатели и критерии эффективности, различная номенклатура объектов управления, отличающиеся способы управления и т.д. Но, с другой стороны, подходы и решения по построению имитационных моделей и их программного обеспечения, по организации исследований очень близки. Это касается и математики управляемого полета, и построения диспетчера времени с очередью событий, состава и организации банков данных, систем отображения и организации этапов моделирования. Даже подходы к построению методов и алгоритмов оптимизации управления воздушным движением гражданских и боевых самолетов имеют много общего. Еще один аргумент: в настоящее время все в большей степени воздушное пространство рассматривается как совместный ресурс, используемый всеми пользователями как гражданскими, так и государственной авиацией. Активно идет интеграция беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в единую систему организации и управления воздушным движением.

В докладе рассмотрены особенности имитационного моделирования авиационных операций обоих типов. Первый тип – это боевые операции с применением авиационного компонента, а второй тип – операции, связанные с организацией «транспортного» воздушного движения, объединяющие полеты всех воздушных судов (ВС), выполняющих полеты со своими целями, но в рамках единой системы (так называемые, trajectory based operations).

1. Имитационное моделирование боевых действий

В ФГУП «ГосНИИАС» разработана имитационная математическая модель боевых действий, которая с учетом цифровой карты рельефа местности и погодных условий позволяет воспроизводить ход боевых действий типа «много-на-много». При этом в конфликте за обе стороны участвуют и, соответственно, моделируются многофункциональные истребители, вооруженные ракетами «воздух–воздух» и «воздух–поверхность», самолеты дальнего радиолокационного обнаружения, беспилотные летательные аппараты; зенитные ракетные комплексы и т. д., функционирующие под управлением автоматизированных командных пунктов.

1.1. Назначение модели. Данная модель предназначена:

- для оценки эффективности авиационных и зенитных комплексов, функционирующих под управлением автоматизированных систем боевого управления;
- для выбора и обоснования рациональной структуры построения, состава и характеристик авиационных и зенитных комплексов, а также систем боевого управления этими комплексами;
- для выбора рациональной тактики боевого применения авиационных и зенитных комплексов;
- для выбора и обоснования рациональной структуры построения, состава и характеристик системы разведки наземных целей и системы сбора и доведения информации;
- в качестве среды отработки и тестирования бортовых алгоритмов самолетов;
- в качестве имитатора воздушной и наземной обстановки на стендах отладки и тестирования функционального программного обеспечения самолетов.

На рис. 1 приведен скриншот, на котором по данным, записанным моделью с помощью средств трехмерной визуализации, воспроизведен фрагмент группового воздушного боя.

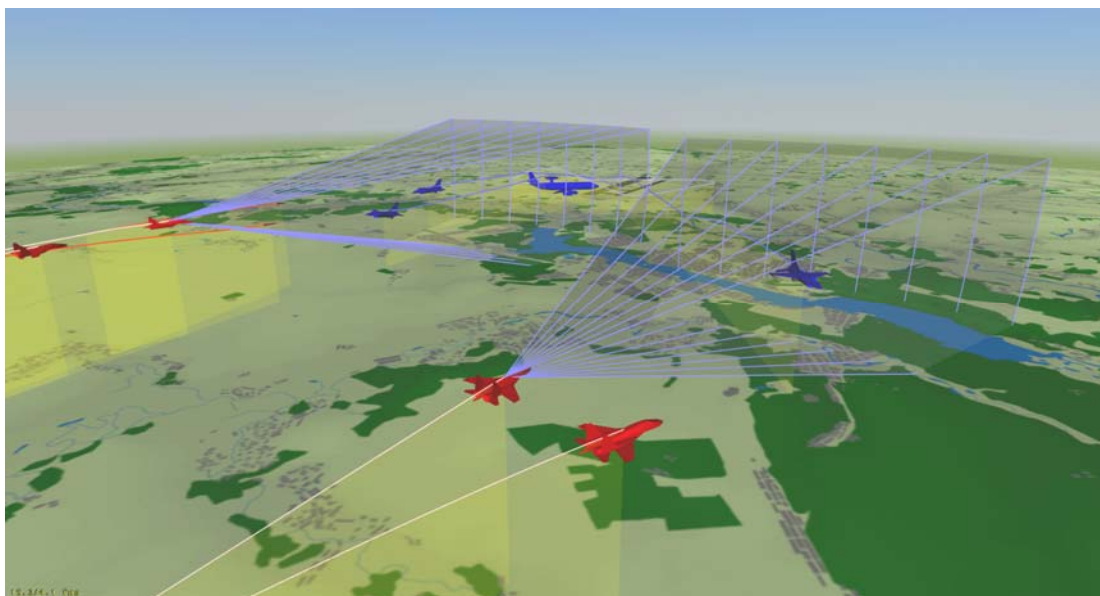


Рис. 1. Фрагмент воздушного боя – атака двумя парами авиационных боевых комплексов Су-27 самолета AWACS, обороняемого многофункциональными истребителями F-16

1.2. Тип моделирования и структура модели. Имитационная модель боевых действий представляет собой программу на языке C++ объемом свыше нескольких десятков тысяч строк исходного кода. Моделирование производится путем имитации наиболее важных информационных и динамических процессов, происходящих при функционировании объектов. Применяемый при моделировании имитационный принцип позволяет охватить значительно большее, по сравнению с аналитическим, число переменных, описывающих систему, дает возможность не вводить при построении математической модели ряд серьезных упрощений и допущений, которые могут привести к получению качественно неверных результатов [1–3].

Функционирование боевых средств имитируется с различной степенью подробности, определяемой решаемой задачей. Рассматривались задачи выбора технического облика и характеристик боевых комплексов, таких как характеристики и режимы рабо-

ты радиолокационных станций, циклограммы работы, летно-технические характеристики ракет «воздух–воздух» и «воздух–поверхность», структура построения и характеристики автоматизированной системы управления.

В разработанной модели применяется смешанный подход к имитации: большая часть процессов моделируется на основе пособытийного принципа, однако некоторые сложные процессы, происходящие в имитируемой сложной системе «свои объекты – объекты противника», моделируются потактово с шагом во времени, соответствующим содержанию процесса. За счет использования пособытийного принципа, при котором имитация моделируемых процессов ведется с неравномерным шагом по времени, обеспечивается высокое быстродействие модели, значительно превышающее реальное время. Последнее особенно важно как для набора необходимого объема выборки и подсчета статистики по показателям эффективности, так и для отладки и тестирования модели, ее гибкого применения.

Математическая модель состоит из модулей, работающих под управлением единого диспетчера, обеспечивающего синхронизацию их работы во времени, обмен данными между модулями, а также считывание из базы данных исходных данных для проведения расчетов и запись результатов моделирования в базу данных.

Укрупненная блок-схема, представляющая структуру модели, показана на рис. 2.

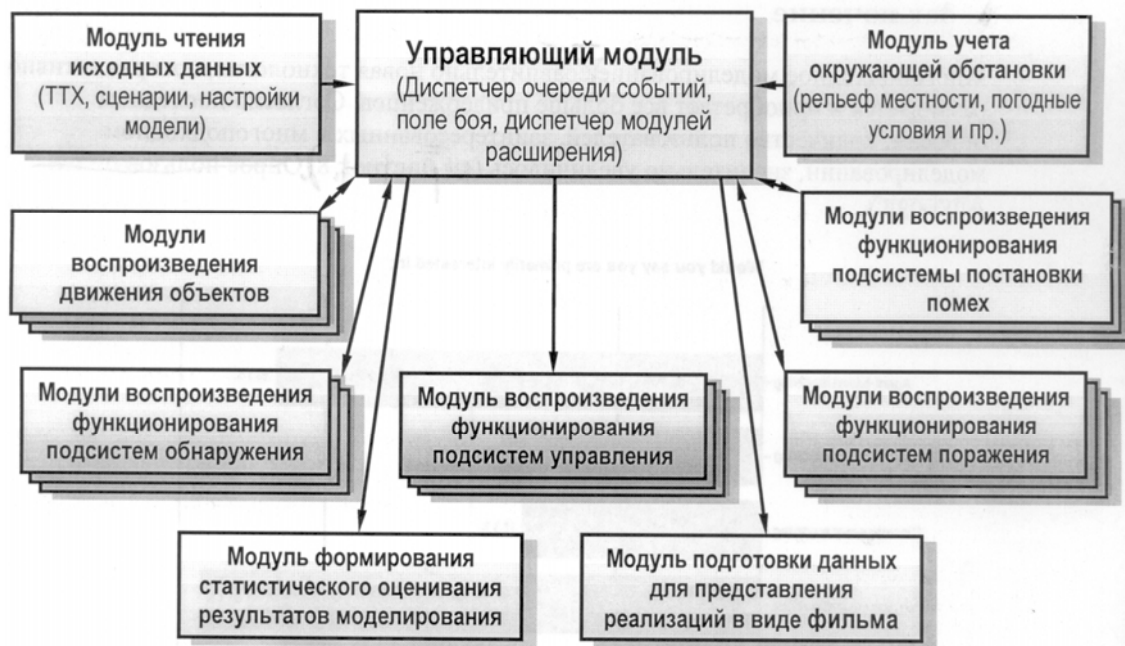


Рис. 2. Укрупненная схема структуры имитационной модели боевой операции

Технология построения программной реализации имитационной модели боевой операции заключается в следующем. Каждый единичный моделируемый объект (самолет, боевая машина зенитного ракетного комплекса, беспилотный летательный аппарат, ракета, танк и т.д.) состоит из контейнера и набора подсистем. Контейнер содержит характеристики заметности объекта и список подсистем. Подсистемы отвечают за воспроизведение функционирования объекта. В состав моделируемого объекта входят: подсистема движения, формирующая траекторию движения (точку стояния объекта); подсистема управления, отвечающая за сбор, обработку, отождествление информации, поступающей от других подсистем, и за выработку команд; подсистемы обнаружения (радиолокационные станции, станции радиотехнической разведки, оптико-электронные станции); подсистемы поражения; подсистемы постановки помех; подсистемы связи и др.

Такое построение моделируемых объектов позволяет обеспечить воспроизведение функционирования широкой номенклатуры средств, участвующих в боевых действиях, за счет:

- компоновки моделируемых объектов из подсистем, имитирующих отдельные функционально независимые подсистемы объекта (одни и те же типы подсистемы могут использоваться разными типами объектов, например, один и тот же тип подсистемы – многофункциональная радиолокационная станция – используется для различных зенитных ракетных комплексов);
- моделирования функционирования подсистем, принадлежащих одному классу, с помощью одного программного модуля и привязки к конкретному типу воспроизводимой подсистемы на уровне задания исходных данных (например, для имитации функционирования радиолокационной станции самолетов и радиолокаторов самоходных огневых установок зенитных ракетных комплексов может использоваться один программный модуль).

В процессе моделирования осуществляется подыгрыш целого ряда случайных факторов: вероятностей поражения наземных и воздушных боевых средств и объектов различных типов, вероятностей их обнаружения, взятия на точное сопровождение, вероятностей правильной передачи команд управления и др.

Расчет выходных показателей эффективности функционирования авиационных и зенитных комплексов осуществляется по выборке, объем которой зависит от потребной в решаемой задаче точности получения результата, и составляет, как правило, несколько сотен реализаций.

1.3. Автоматизированная система анализа эффективности «Атлант». Представленная имитационная модель используется в составе автоматизированной системы анализа эффективности зенитных комплексов и систем «Атлант» (рис. 3) [4]. Кроме непосредственно самой имитационной модели в состав автоматизированной системы входят:

- ✓ база данных, содержащая тактико-технические характеристики моделируемых образцов вооружения, различные варианты сценариев боевых операций, задающие состав средств за обе взаимодействующие в боевой операции стороны, организацию их управления и размещение в пространстве и времени, а также различные варианты условий применения, определяющие тип рельефа местности и климатические данные;
- ✓ средства графического отображения динамики операции на мониторе компьютера в трехмерном изображении, позволяющие наглядно продемонстрировать процессы, происходящие в ходе боевых действий;
- ✓ средства организации диалога человека с компьютером, реализующие пользовательский интерфейс на естественном проблемно-ориентированном языке и предоставляющие пользователю автоматизированной системы возможность выбора наиболее удобного для него способа организации и проведения расчетов, задания исходных данных и анализа полученных результатов.

Данная имитационная математическая модель боевых действий может быть также использована в составе тренажерного комплекса, поскольку обеспечивает с учетом цифровой карты рельефа местности и погодных условий:

- ♦ возможность имитации действий боевых средств, воспроизведение которых требуется в тренажерном комплексе;
- ♦ высокую адекватность имитации функционирования авиационных и зенитных комплексов, подтвержденную в ходе выполнения ряда работ;
- ♦ возможность воспроизведения, как в реальном, так и в ускоренном времени хода масштабных боевых действий (с участием до 10000 объектов типа самолет, беспилотники).

лотный летательный аппарат, зенитный ракетный комплекс, ракета, танк, боевая машина пехоты и т.д.).

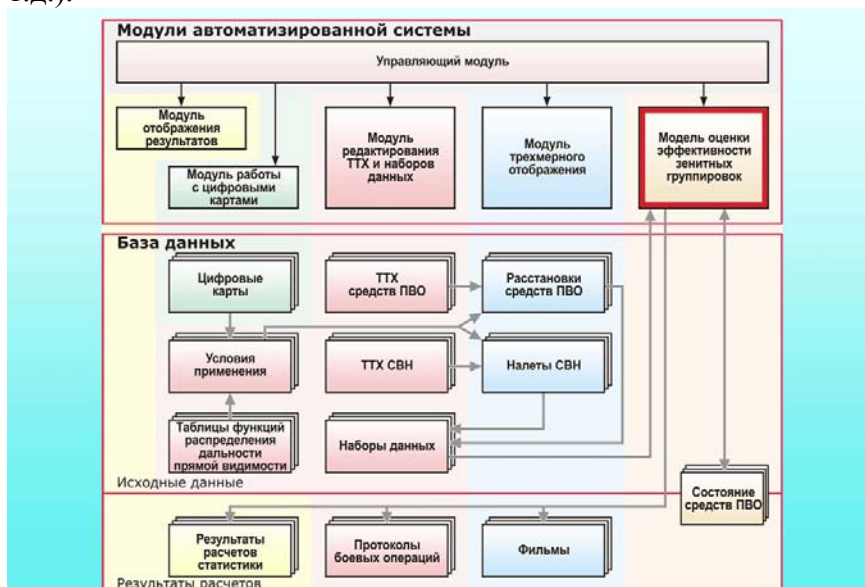


Рис. 3. Схема взаимодействия основных частей автоматизированной системы анализа эффективности ЗРК «Атлант»

В настоящее время в модели боевых действий управление функционированием имитируемых объектов осуществляется с помощью автоматических устройств (математических «автоматов»). Для использования данной модели в составе тренажерного комплекса проводится ее доработка, связанная с передачей управления для части имитируемых объектов к функциональным и процедурным тренажерам, а также с выдачей на тренажеры данных текущей воздушной и наземной обстановки.

1.4. Особенности разработанной имитационной модели. Разработанная в ГосНИИАС математическая модель боевых действий авиационных и зенитных ракетных комплексов является уникальным специализированным программным средством. Отличительная особенность данной модели заключается в реализации большой скорости расчетов без потери точности выходных результатов.

Построение описанной модели выполнено на языке C++ с помощью современных подходов к проектированию программных продуктов большого объема, создающих не только удобство работы с программным кодом, но и обеспечивающих простоту его наращивания и модернизации, работу над проектом большой группы специалистов одновременно.

Представленная имитационная математическая модель использовалась на практике для обоснования облика зенитных ракетных систем и комплексов, разработке и отработке бортового программного обеспечения самолета РЛДН [5].

2. Математическое моделирование систем организации воздушного движения (ОрВД) самолетов гражданской авиации

2.1. Задачи математического моделирования в области ОрВД. Системы организации и управления воздушного движения относятся к наиболее сложным человеко-машинным иерархическим и распределенным, многомерным и многосвязным системам управления. К их функционированию предъявляется большое число часто противоречивых требований, главными из которых являются высокая безопасность полетов наряду с высокой эффективностью их выполнения. В силу специфики области использования системы широкие и системные натурные исследования практически неприменимы, аналитические исследования и аналитическое моделирование также очень

ограничены. Даже полунатурное моделирование может иметь только узкое применение: в связи с отмеченными особенностями системы адекватное моделирование требует создания очень сложных с технической точки зрения человеко-машинных комплексов моделирования, участия многих операторов – диспетчеров и пилотов. Такие уникальные комплексы необходимы для тестирования эффективности разрабатываемых процедур управления воздушным движением (УВД), но решение всего комплекса возникающих вопросов с их помощью не обеспечить. В этих условиях особое значение приобретают математическое имитационное моделирование и программные комплексы, обеспечивающие подготовку, собственно моделирование и обработку полученных результатов.

Необходимо отметить, что в области УВД, впрочем, как и в других сложных технических системах, понятия «математическая модель» и математическое моделирование как процесс используются для решения трех различных задач:

- собственно математическое моделирование, как средство поддержки при проведении синтеза системы и исследования ее функционирования в различных условиях (как часто говорят, для получения ответа на вопрос «что, если?» («what if?»)), для валидации системных решений, схем, методов и алгоритмов управления – исследовательские имитационные модели;
- сопровождающее моделирование реального образца системы – сопровождающие имитационные модели;
- моделирование как средство поддержки и ускорения принятия решения человеком непосредственно в контуре (процессе) реального управления – модели, поддерживающие принятие решений.

С методической стороны все три группы моделей очень близки, в них могут использоваться одни и те же средства, процедуры, алгоритмы. Тем не менее, в настоящей работе рассматриваются модели применительно к первой группе задач.

Особое значение имитационного моделирования процессов организации и управления воздушным движением связано с продолжающейся модернизацией систем ОрВД в мире. Эта реорганизация связана с внедрением технологий CNS/ATM (Communication, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management – Связь, навигация и наблюдение/Организация воздушного движения), обеспечивших возможность кардинального изменения принципов, процедур, методов планирования и управления. А необходимость изменений вызвана значительным увеличением интенсивности воздушного движения (ВД), при котором во многих регионах практически достигнуты пределы возможностей существующей системы. Это обстоятельство дополняется выходом на первый план вопросов эффективности как выполнения полетов пользователями воздушного пространства (ВП), так и собственно системы УВД. В настоящее время такие работы объединены в первую очередь вокруг двух гигантских научно-технических программ модернизации систем ОрВД – SESAR (Европа) и NextGen (США). Для разработки и внедрения новых процедур и методов планирования и управления ВД необходимы исследовательские имитационные модели.

2.2. Краткий обзор моделирующих средств. Традиционно рассматриваются две группы моделируемых процессов и систем: системы управления воздушным движением и системы планирования использования воздушного пространства (ПИБП), хотя такое деление становится все более условным.

В рамках *моделей процессов управляемого воздушного движения*, получивших наиболее широкое распространение и известность в мире, следует отметить следующие комплексы моделирования [2]: AirTop, AwSim, FACET, HERMES, NARIM, NASPAC, National Flow Model, OPAS, OPGEN, RAMS, Regional Traffic Model, SDAT, SDAT, SIMMOD PRO, SIMMOD PLUS, TAAM, TARGETS, SAAM, NEVAC.

Большинство моделей являются моделями среднего (mesoscopic) и высокого (microscopic) уровня подробности, очень небольшое число моделей – с малой (macroscopic) степенью подробности. Около половины моделей могут быть отнесены к моделям с изменяемым уровнем подробности. Большинство моделей являются стохастическими.

Наиболее часто реализуется моделирование траектории полета, окружающей среды, области выполнения полетов (на маршруте, в районе аэропорта, в терминальной области), средств связи, наблюдения, навигации и информационных потоков, а также работы персонала, моделируется эшелонирование ВС (разделения самолетов в воздухе), предотвращение столкновения с земной поверхностью и препятствиями, разделение самолета с закрытым ВП, обнаружение и разрешение парных и множественных конфликтов. При моделировании производится вычисление множества показателей эффективности и применяются оптимизационные процедуры: оптимизация маршрутов, в том числе на поверхности аэродрома, оптимизация высоты крейсерского полета, выполняется организация потоков воздушного движения (ОПВД)), ресекторизация и изменение конфигурации на аэродроме, а также оптимизация структуры воздушного пространства.

Среди *средств моделирования процессов ПИВП* можно выделить: ABNA, ACES, AEM3, ATC-HPM, ATTLA, AwSim, CAASD, COSAAC, FACET, JSE, LMINET, MEANS, Mentor, NARIM, NASPAC, NFM, OPAS, PACER, SIMMOD, **ТААМ**, TACOT, TARGETS, TOPAZ, **SAAM**, NEVAC.

Наиболее часто моделируются следующие процессы планирования и ОПВД: изменения времени вылета с учетом пропускной способности (ПС) аэропорта, схемы назначения слотов, программы задержек и остановок на земле, ограничения на маршруте или в пунктах маршрута по продольному эшелонированию, изменения, вносимые в полет по маршруту (в связи с ограничением ПС секторов), прогнозирование загрузки диспетчера и влияния этой загрузки на ПС и эффективность управления «транзитным» потоком ВД в маршрутном секторе, движение в аэропорту и приаэродромной области, изменение временных составляющих планов полета, выбор приемлемых маршрутов с учетом местоположения областей плохой погоды, прогнозное обнаружение конфликтов в различных вариантах, взаимодействие различных участников ВД при совместном принятии решений.

2.3. Выбор типа моделирования. Цели моделирования систем ОрВД весьма многочисленны и разнообразны. Поэтому в зависимости от ставящихся конкретных целей и особенностей решаемых исследовательских задач могут использоваться следующие группы «инструментов» моделирования:

- расчетные математические модели, позволяющие оценить с достаточной точностью требуемые показатели, описывающие ту или иную сторону функционирования системы ОрВД, без непосредственного моделирования собственно процессов в динамике их развития.

- имитационное математическое моделирование, позволяющее определить (вычислить) требуемые показатели путем непосредственного компьютерного моделирования процессов планирования и управления ВД в динамике их развития и обработкой получаемых при этом результатов.

Как показывает анализ [7], в существующих моделирующих системах нашли применение и широко используются оба варианта моделирования, причем применяют различные типы второго:

- ускоренное дискретно-событийное моделирование;
- собственно динамическое моделирование в реальном и/или ускоренном времени;

– агентное моделирование.

Соотношение областей применения расчетного и имитационного моделирования представляет большой интерес. Первый напрашивающийся вывод: математическое моделирование должно применяться на предварительных этапах исследования, а затем, при необходимости получения более точных результатов, следует повторить исследования методами более детального имитационного моделирования. Однако все не столь очевидно. Прежде всего ситуация зависит от решаемых задач. Большая группа задач связана с исследованиями по использованию ВП и оценкой влияния многочисленных факторов:

- влияние на показатели ИВП интенсивности и структуры потоков ВД;
- влияние на эти показатели структуры ВП (трассовой структуры, структуры аэродромного ВП, конфигурации и графиков работы секторов управления, структуры и состава наземных средств);
- влияние на показатели изменения правил и процедур выполнения полетов;
- влияние точности навигации на уровень безопасности полетов;
- оценка уровней риска.

Для таких исследований более целесообразно применять расчетное моделирование. В качестве полетных данных могут использоваться потоки, соответствующие реальным плановым или фактическим данным, либо потоки, построенные на их основе. Расчетные соотношения для вычисления показателей ИВП (алгоритмы модели) основываются на гипотезе выполнения полетов в соответствии с исходными полетными данными. При этом можно учитывать статистический характер выполнения полетов (например, точность выдерживания траектории). Основной недостаток – ограниченная точность получаемых оценок, связанная с отсутствием учета отклонений реально выполняемых полетов от плановых характеристик.

Имеется целый ряд задач, действительно требующих именно моделирования процессов в динамике их развития. Это задачи, связанные с моделированием ситуаций управления с обратной связью (когда событие, которое в принципе может быть спрогнозировано по исходным данным, повлечет за собой существенное изменение ситуации относительно прогноза по исходным данным). Имеются в виду прежде всего ситуации с моделированием влияния на процессы и траектории полета управляющих воздействий, вырабатываемых диспетчерами УВД и экипажем в ответ на реализующиеся условия полета. В этих случаях моделирование таких динамических процессов необходимо. В качестве примеров можно привести следующие задачи:

- моделирование управления очередью на прилет и/или вылет;
- моделирование с целью исследования «эффекта домино» при предотвращении нарушений норм эшелонирования в условиях плотного ВД.

Еще одна причина обоснованности применения имитационного моделирования связана с необходимостью учета и оценки влияния случайных факторов на процессы ОрВД. При достаточно сложных моделях этих случайностей построение адекватных расчетных моделей может стать нереальным, при этом, действительно, гораздо проще провести статистическое моделирование «в лоб».

2.4. Программный исследовательский комплекс КИМ ОрВД. Исследовательский комплекс имитационного моделирования систем и процессов ОрВД «КИМ ОрВД» предназначен для проведения исследований, связанных с разработкой мер по совершенствованию как структуры воздушного пространства, так и процедур планирования и управления потоками ВД, а также для анализа эффективности предлагаемых мер.

Программный исследовательский комплекс КИМ ОрВД [8–12] (рис. 4) состоит из следующих ключевых подсистем:

- средства подготовки исследовательских вариантов потоков ВД, структуры ВП, условий выполнения полетов и состояния системы ОрВД. Сюда включаются как автоматизированные, так и полностью автоматические средства синтеза, в том числе средства оптимального синтеза;
- средства хранения исследовательских вариантов, а также настройки имитационных моделей на любой подготовленный сценарий;
- собственно средства моделирования (как расчетные (математические), так и имитационные модели);
- средства обработки (в том числе статистической), визуализации и архивирования процессов и результатов моделирования.



Рис. 4. Обобщенная схема исследовательского комплекса «КИМ ОрВД»

Для подготовки и проведения моделирования приняты следующие подходы. Все операции выполняются в рамках взаимосвязанного программного обеспечения, использующего единые БД, единые расчетные и интерфейсные средства анализа ИВП, единое картографическое ядро. Для решения отдельных и конкретных оптимизационных задач используются специализированные, ориентированные для конкретного применения алгоритмы и процедуры. В составе моделирующего комплекса реализован целый ряд задач синтеза (синтез исследовательских потоков ВД, регулирование потоков ВД, синтез маршрутов и ремаршрутизация, синтез структуры района УВД, формирование конфигураций и графиков работы секторов УВД, управление очередью прибывающего и вылетающего потока ВС и др.). Синтез проводится на базе разнообразных математических подходов, включающих методы теории вероятностей и математической статистики, методов условной оптимизации и нелинейного программирования, эволюционно-генетических методов, методов теории массового обслуживания и др.

При моделировании учитываются многочисленные случайные факторы, свойственные системе: случайные потоки ВД, погрешности выполнения планов полетов, случайные условия (например, метеорологические) и состояние системы (например, пропускная способность ее элементов) и др.

КИМ ОрВД на протяжении ряда лет успешно применяется во ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», а также ГосНИИАС при решении многочисленных исследовательских задач.

2.5 Примеры использования имитационного моделирования. Первой рассматривается задача исследования эффективности различных вариантов регулирования потоков ВД путем назначения слотов вылета, а также влияния на эффективность различных стратегий как централизованной системы планирования, так и пользователей. Актуальность таких исследований определяется назревшей необходимостью, стоящей перед аэронавигационной системой РФ, внедрения средств регулирования потоков ВД на этапе текущего планирования и, соответственно, тактической ОПВД.

Схема процесса регулирования потока ВД представлена на рис. 5. В процессе регулирования участвуют Главный центр (ГЦ) регулирования потоков, аэродромные диспетчерские пункты (АДП), авиакомпании (АК) (или экипажи ВС). Из АК в систему ОПВД поступают заявки на полеты (сообщения FPL), система ОПВД решает задачу выбора перегруженных элементов ВП, расчета задержек рейсов, которые могли бы привести к устранению перегрузок ВП, и рассылает соответствующие сообщения (ANM, AIM, SAM, SRM, SLC, SIP, FLS, DES) заинтересованным органам – АК и АДП. Процесс регулирования замыкается обратной связью – реакцией объектов регулирования АДП и АК в виде сообщений SMM, SPA, SRJ, RFI, SWM, DLA, CHG, CNL, FPL.

Целью регулирования является обеспечение бесконфликтного (с отсутствием превышений нормативов пропускной способности аэродромов и секторов управления УВД) потока путем реализации минимального изменения заявленных условий (минимальных задержек на вылет). Динамика процесса определяется изменением во времени потока заявок на полеты, изменением состояния системы, а также собственно процессом регулирования. Процесс регулирования обеспечивается путем обмена сообщениями (в форме телеграмм) между участниками регулирования.

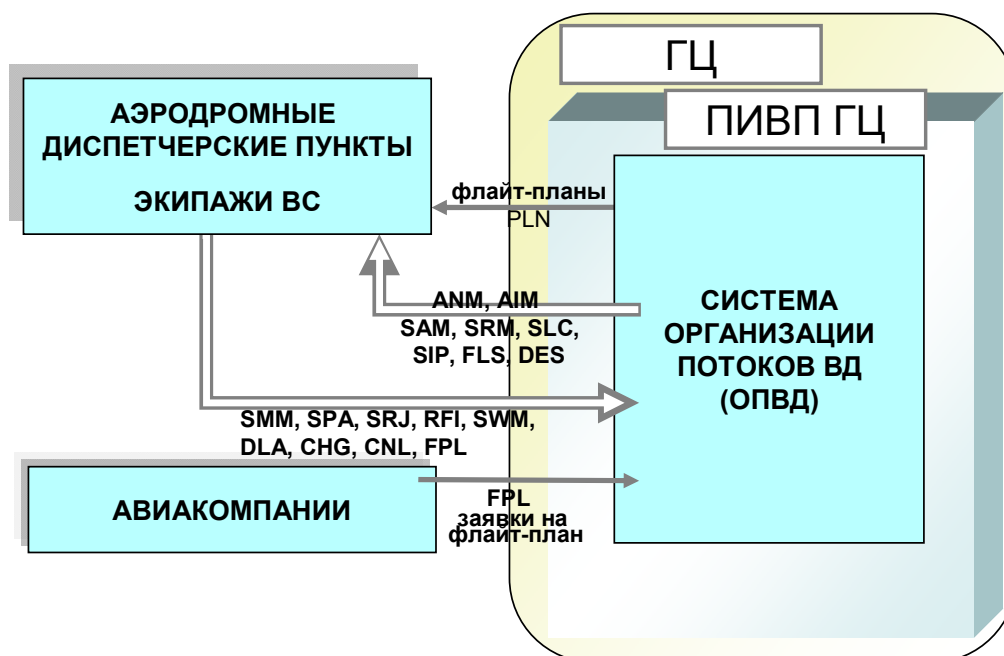


Рис. 5. Моделирование регулирования потоков воздушного движения

Неопределенность (стохастичность) процессов определяется случайным характером формирования заявок на полеты, возможностью различной реакции эксплуатанта на регулирование, случайным характером условий вылета и выполнения полетов.

Целью исследований является оценка последствий внедрения и выработка рекомендаций. Основные показатели, по которым оценивается эффективность регулирования потоков ВД путем назначения слотов вылета: суммарная задержка, фактически реализованная по причине регулирования (на интервале 24 ч с начала регулирования), оставшаяся после регулирования перегрузка (если регулирование не справляется полностью со своей задачей), количество регулируемых полетов, средняя задержка на полет. Благодаря имитационному моделированию процесса регулирования потоков ВД могут быть выбраны параметры регулирования, позволяющие достичь решения проблемы с перегрузками системы с минимальной суммарной задержкой ВС из-за регулирования.

В качестве второго примера имитационного моделирования в интересах отработки стратегий управления воздушным движением рассматривается моделирование процессов управления очередью на прилет на аэродром с применением при этом специального средства поддержки работы диспетчера AMAN (Arrival manager) и специальных оптимизационных процедур (рис. 6).

Задачи, решаемые с использованием имитационной модели движения ВС в районе аэродрома, состоят в следующем:

- валидация программных средств, а также реализованных в их составе оптимизационных методов и алгоритмов управления;
- оценка эффективности управления прилетом ВС при различных схемах управления;
- оценка пропускной способности отдельной взлетно-посадочной полосы и аэропорта в целом;
- оценка эффективности структуры ВП и выявление путей ее совершенствования.

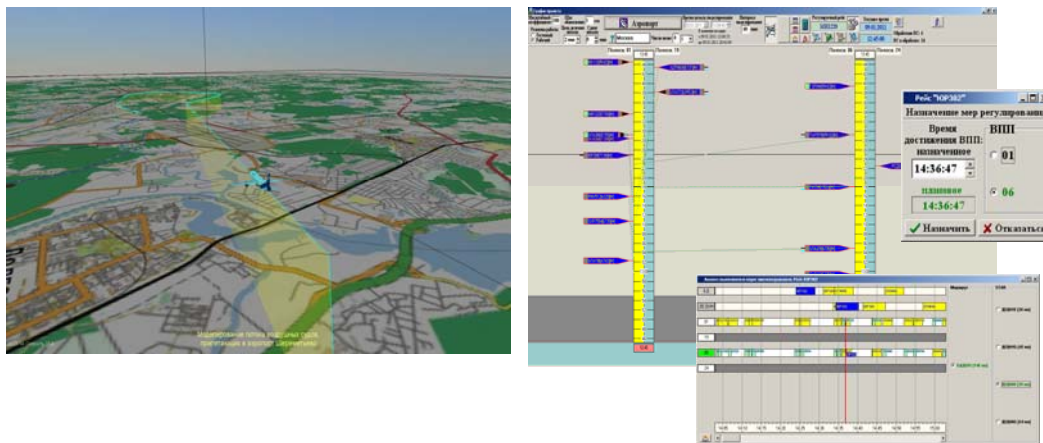


Рис. 6. Моделирование процессов управления очередью прилета на аэродром

Заключение

Представлен опыт ФГУП «ГосНИИАС» в части разработки имитационных математических моделей процессов функционирования авиационных систем и комплексов управления как в боевых операциях, так и операциях, связанных с организацией и управлением воздушным движением самолетов гражданской авиации. Данные модели созданы коллективами разработчиков и непрерывно модернизируются и совершенствуются под вновь возникающие практические задачи. Наиболее широко они используются для поддержки принятия технических и организационных решений, отработки алгоритмического и программного обеспечения систем управления различного уровня и назначения, создания тренажерных комплексов.

Литература

1. Вишнякова Л. В., Кухтенко В. И., Слатин А. В. Применение методов декомпозиции к задаче оптимального проектирования зенитной ракетной системы и ее элементов на ранних этапах разработки // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. № 4.
2. Вишнякова Л. В., Кухтенко В. И. Система автоматизированного формирования облика ЗРК // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1993. № 6.
3. Вишнякова Л. В., Карп К. А., Малышев В. В. Формирование облика ЗРК (учебное пособие). М.: МАИ, 2003.
4. Вишнякова Л. В., Слатин А. В. Автоматизированная система анализа эффективности ЗРК // Сборник докладов 2 ЦНИИ МО РФ, 2002.
5. Березнев Е. В. и др. Имитационная математическая модель боевых действий и средства трехмерной визуализации для отработки ФПО самолета РЛДН // Труды научн.-техн. конф. «Актуальные вопросы создания информационно-управляющих систем, М., «Концерн радиостроения «Вега», 2011.
6. Павловский Ю. Н., Белотелов Н. В., Бродский Ю. В. Имитационное моделирование. М.: ИЦ «Академия», 2008.
7. Дегтярев О. В., Зубкова И. Ф. Ускоренное моделирование процессов организации потоков и управления ВД. Аналитический обзор. М.: НИЦ ГосНИИАС, 2008.
8. Дегтярев О. В. и др. Комплекс имитационного моделирования потоков воздушного движения // Сб. трудов ГосНИИАС. Сер. Вопросы авионики, 2003. Вып.2(12).
9. Degtiarev O. V., Egorova V. P. Regulated Air Traffic Flow Simulation Tool // 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Sanct-Peterburg, 2003.
10. Дегтярев О. В. и др. Комплекс имитационного моделирования УВД // Труды научн.-техн. конф. «Авиационные системы в XXI веке». Т. 2. М.: НИЦ ГосНИИАС, 2006.
11. Вишнякова Л. В. и др. Комплекс имитационного моделирования системы ОрВД РФ // Российско-европейский семинар «Концепции и технологии ОрВД»/ Труды. М., 2007.
12. Дегтярев О. В., Зубкова И. Ф. Применение имитационного моделирования в качестве средства интеллектуальной поддержки принятия решений в задачах организации и управления воздушным движением // Труды 8-й Международной научн.-техн. конф. «Интеллектуальные системы». Нижний Новгород, 2008.

ИМИТАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: ОТ КЛАССИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДО ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

С. А. Власов (Москва), В. В. Девятков (Казань), Н. Б. Кобелев (Москва)

Имитационное моделирование (ИМ) неуклонно становится эффективным средством для совершенствования процессов проектирования и модернизации сложных систем. Многие годы ИМ успешно применяется при обучении системному анализу в ВУЗах и выполнении крупных научных проектов для анализа, оценки и прогнозирования вариантов решений. Кроме учебного и научного использования ИМ появляется все больше примеров практических применений моделей в реальной экономике. Только за несколько последних лет авторы участвовали в реализации ряда проектов по созданию систем автоматизации имитационных исследований (САИИ) в различных областях экономики, авиации, железнодорожном транспорте, металлургии, нефтедобыче, судостроении и т.д. [1–5]

Учебные модели обычно несложны по логике, структуре и объему, но зато их много. В масштабах России – это сотни вузов и десятки тысяч новых моделей ежегодно. Чаще всего это модели, объемом не превышающие 100–150 блоков (в терминологии языка GPSS). В связи с этим при выполнении лабораторных заданий, курсовых и дипломных работ не проводится детальное исследование. Обычно ограничиваются процессом написания модели, ее отладкой и проведением небольшого количества экспериментов (от нескольких единиц до нескольких десятков). Конечно, студенты и аспиранты могут создавать большие и сложные модели, но чаще всего в учебном процессе используются бесплатные студенческие версии систем ИМ, в которых основным ограничением является объем модели. В настоящее время проводится серьезное оснащение вузов лицензионным программным обеспечением, надеемся, что будут приобретены и академические лицензии лучших языков ИМ и САИИ. Тогда появятся сложные учебные модели, будут проводиться более детальные имитационные исследования. Студенты получат более качественные знания и навыки, которые смогут использовать в своей будущей деятельности.

Научные модели всегда отличались сложностью и глубиной проводимых с их помощью исследований. Это модели, содержащие сотни и даже тысячи варьируемых параметров (факторов). При этом анализируются десятки самых разнообразных показателей работы модели. В научных имитационных исследованиях на практике для получения качественного и точного решения требуется проведение множества серий экспериментов. Чаще всего, для сложных систем – это сотни и тысячи экспериментов. Далее все результаты этих экспериментов нужно обработать и комплексно проанализировать. Исследователь должен найти разумный, подходящий, а еще лучше оптимальный режим функционирования системы. В нашей стране сегодняшняя ситуация с научными имитационными исследованиями удручает, их практически нет. Парадокс, но при выполнении исследований даже используются бесплатные студенческие или устаревшие (ранее приобретенные или пиратские) версии систем ИМ. Но, мы верим, что в этом секторе применения ИМ наступит прорыв, все предпосылки для этого есть. Ведущие НИИ начинают приобретать или заказывать современные САИИ, их состав пополняют молодые амбициозные сотрудники, часто защищающие диссертации в области ИМ. Скорее всего, в ближайшие годы следует ожидать значительного увеличения количества научных моделей и повышения их вычислительной сложности.

В последние годы резко выросло **практическое использование имитационных исследований**. Особенно это характерно для крупных предприятий различных отраслей. По существу, именно этот сектор применения позволил выжить компаниям – раз-

работчикам средств ИМ и стал катализатором развития всех типов САИИ. Учитывая особенности и запросы аналитиков предприятий, сформировался ориентированный на корпоративные предприятия тип САИИ – имитационные приложения. Был создан целый класс новых, ранее не проработанных элементов технологии создания САИИ – автоматической генерации моделей, автоматического интерфейса с системами мониторинга данных, обработки выборок большой размерности, распределенной обработки действий исследователя на различных этапах исследования, создание специализированных языков диалога, ввода исходных данных модели и вывода результатов моделирования, автоматизированного документирования результатов имитационного исследования.

Опыт разработки и эксплуатации имитационных приложений не только позволил усовершенствовать существующий процесс исследований, но и показал, что необходимы радикальные изменения в традиционном подходе к имитационным исследованиям: технологии создания модели и проведения исследований, архитектуре организации вычислений, методах взаимодействия пользователя с системой, стандартизации интерфейсов и т.д.

Все множество создаваемых САИИ можно разделить на три типа: для профессионалов, для массового использования и для корпоративных клиентов [6], [7]. Каждый тип имеет свои функциональные, вычислительные и прикладные особенности.

В частности в **САИИ для профессионалов** больше уделяется внимания вопросам построения и отладки модели, проверке адекватности модели, технике и технологии проведения всего цикла имитационных исследований. Пользователями этого типа САИИ являются высококвалифицированные и подготовленные в области системных исследований и информатики специалисты: студенты, преподаватели, аспиранты и докторанты специализированных вузов, научные работники НИИ, системные аналитики предприятий и организаций, поэтому в меньшей степени они нуждаются в упрощении языка взаимодействия с системой, и в большей степени им необходим как можно более полный функционал для построения моделей и проведения исследований.

В **САИИ для массового использования**, наоборот, на первый план выходит простота и наглядность использования системы, снижение квалификационных требований для потенциальных пользователей. Пользователями этого типа САИИ могут быть специалисты, имеющие лишь навык работы с компьютером и не имеющие специальных знаний по системному анализу: студенты, преподаватели, аспиранты, научные работники, руководители, системные аналитики и инженеры любых вузов, предприятий и организаций. САИИ этого типа, расширяя круг потенциальных пользователей ИМ, позволяют строить модели не столь детально как у профессионалов. В то же время уровень получаемых результатов исследования достаточен для оперативного и точного прогноза функционирования моделируемой системы.

В **САИИ для корпоративных клиентов** (имитационных приложениях), в дополнение к еще большей простоте и наглядности САИИ для массового использования и детальности, САИИ для профессионалов, добавляется специфика Заказчика: привязка к существующим БД исходных данных, формам представления данных и результатов, сложившихся в данной предметной области. Использовать имитационные приложения могут руководители, системные аналитики и специалисты только данного предприятия в соответствии с ролью, отведенной разработчиками приложения при его создании. Язык взаимодействия пользователя с САИИ данного типа полностью «привязан» к предметной области деятельности Заказчика.

Возможные взаимосвязи различных типов САИИ и применений имитационных исследований показаны на рис. 1.

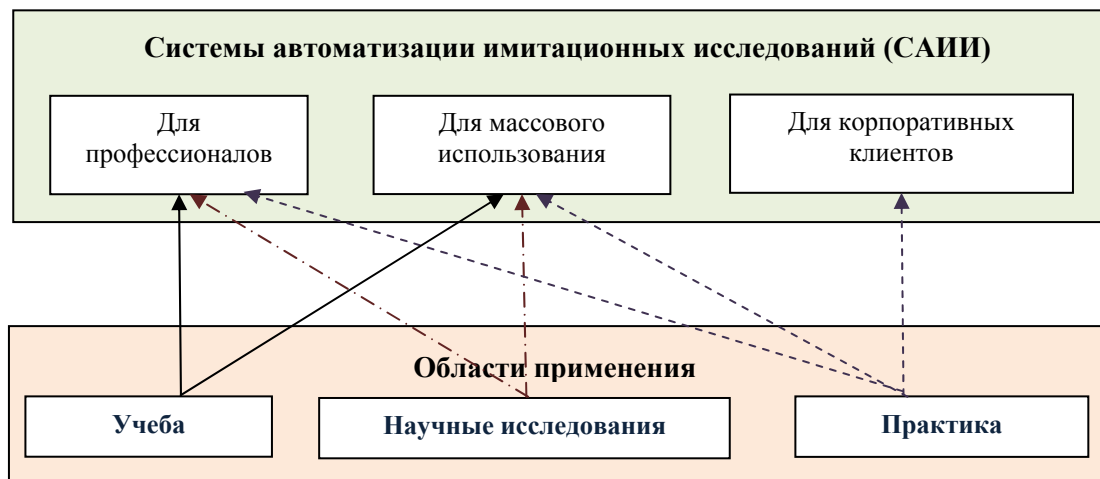


Рис. 1

Длительность имитационных исследований

Как показано в [8], имитационное исследование может быть представлено как дискретный процесс (S), состоящий из множества этапов (n) и состояний этапов (m):

$$[S = \{S_l\}_l], \text{ где } l = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Каждое подмножество S_l в свою очередь – это множество состояний j для l – го этапа имитационного исследования. Следовательно

$$S_l = \{S_l^j\}, \text{ где } l = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m_l}. \quad (2)$$

Одним из основных количественных критериев, наряду со стоимостью, адекватностью, точностью и т.д., является время проведения исследования ($T_{ин}$).

$$T_{ин} = \sum_{l=1}^n T_l = \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^{m_l} T_l^j, \quad (3)$$

где T_l^j – время исполнения состояния j этапа l

Не учитывая состояния этапов, детализируем изменение длительности каждого этапа T_l для трех подходов проведения имитационного исследования. **Первый подход**, это «Раннее ИМ» – использование «старых» общецелевых систем ИМ (GPSS, SIMULA и др.) и различных программ обработки статистики и результатов моделирования. Этот подход еще до сих пор используется в наших вузах и на предприятиях. **Второй подход**, это «Современное ИМ» – использование современных общецелевых систем ИМ (ARENA, AnyLogic, Extend и др.). И, наконец, **третий подход**, развиваемый авторами, – использование САИИ, комплексной автоматизации большинства этапов и общецелевых систем ИМ в качестве моделирующего ядра.

За основу разбиения процесса имитационного исследования на этапы возьмем разбиение на 11 основных этапов, предложенное классиком ИМ Р.Шеноном [9]. Авторами, на основе собственного опыта и опроса коллег в мире ИМ, была проведена экспертная оценка длительности каждого из этапов и всего процесса для всех трех подходов.

Полученные усредненные результаты длительности каждого этапа и всего процесса имитационного исследования приведены на рис. 2.



Рис. 2

Если в «Раннем ИМ» определяющим в оптимизации значением T_i являлось уменьшение времени ручных операций (T_p), проводимое исследователем (практически 95% времени исследования), то в связи с автоматизацией исполнения практически всех этапов все в большей степени приобретает значение и «компьютерная» составляющая времени, затраченного исследователем на проведение различных вычислений на каждом из этапов (T_a). Сейчас время выполнения ручных и автоматизированных операций практически выравнивается, хотя длительность ручных все еще больше. Поэтому, исключительно важно учитывать временные затраты на компьютерные вычисления. Следует также подчеркнуть, что значения T_p зависят от субъективных факторов: квалификации исследователя, его умения работать без ошибок и качественно. В уже сложившейся и используемой технологии исследования длительность ручных операций будет зависеть только от исследователя, и повлиять на эту длительность организационно-административными действиями очень сложно. Остается только один, объективно управляемый способ – постепенная и более глубокая автоматизация оставшихся ручных операций и ускорение выполнения всего комплекса программ.

На рис. 3 количественно показана тенденция изменения соотношения в $T_{ин}$ между T_p и T_a в классическом подходе и при использовании САИИ.

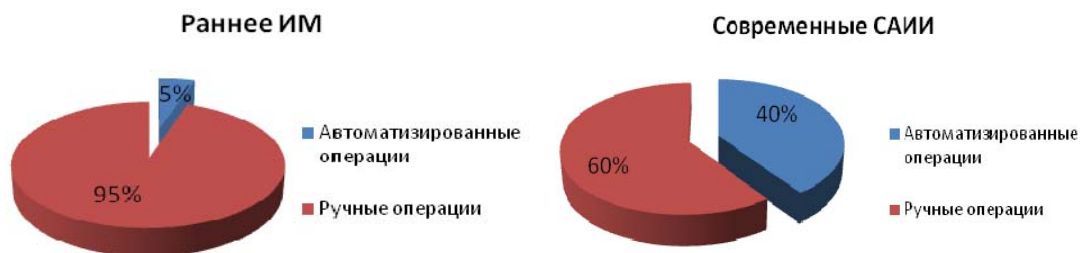


Рис. 3

Очень важным моментом является то, что в отличие от ручных операций, автоматизированные операции поддаются прямому регулированию длительности посредством повышения скорости вычислений (более производительный процессор или компьютер, количество вычислительных ядер, параллельности вычислений, большая оперативная и внешняя память и т.д.).

Вычислительная сложность имитационных исследований

Так как длительность автоматизированных операций стала значительной, то значимой стала и задача минимизации этой длительности. Вычислительная сложность имитационного исследования $S_{им}$ определяется множеством факторов. Основными объективно влияющими на $S_{им}$ факторами являются сложность до модельных вычислений, сложностью вычислений при построении модели, сложность вычисления и реализации плана исследования и сложность автоматизированного документирования исследования.

Множество домодельных факторов $\{V_{dm}\}$ – это автоматизированное исполнение постановки задачи исследования, сбора и обработки данных, способов передачи их в модель и т.д. Множество модельных факторов $\{V_m\}$ – это объем модели, ее алгоритмический уровень, степень детализации, выбранная единица модельного времени, период моделирования и т.д. Множество факторов эксперимента $\{V_{nu}\}$ – это количество одиночных и серий экспериментов, степень детализации сбора результатов при мониторинге эксперимента, использование оптимизирующих алгоритмов, способы представления результатов эксперимента (графика, анимация и т.д.), структура хранения результатов моделирования и т.д. Множество факторов документирования $\{V_{du}\}$ – это вариация способов автоматического сохранения результатов в виде документов общедоступных офисных систем и средства редактирования отчета.

В итоге вычислительную сложность исследования можно представить как функцию от множества факторов:

$$S_{им} = F(\{V_{dm}\}, \{V_m\}, \{V_{nu}\}, \{V_{du}\}). \quad (4)$$

Для получения количественных оценок требуемой вычислительной мощности при проведении имитационных исследований нужно подробно рассмотреть каждое из этих четырех множеств факторов. Но, учитывая ограничения по объему статьи, рассмотрим более подробно множество $\{V_{пи}\}$, так как оно на наш взгляд наиболее влияет на общую вычислительную сложность исследования. Данное множество факторов возникает на этапах планирования и проведения экспериментов с моделью S7, S8, и S9. Модель на этом этапе разработана, и с ней нужно проводить эксперименты. Основной количественной характеристикой, определяющей вычислительную мощность данного этапа, является время планирования и проведения всех экспериментов ($T_7 + T_8 + T_9$) с моделью. Основными составляющими этого времени являются количество серий экспериментов в исследовании ($i = 1, n$), количество экспериментов в i серии ($j = 1, i$) и время выполнения одного эксперимента с моделью $T(\varepsilon)_i^j$ в конкретной серии и эксперименте. Поэтому формулу вычисления общего времени выполнения данного этапа можно представить следующим образом:

$$T_7 + T_8 + T_9 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i T(\varepsilon)_i^j, \quad (5)$$

где $T(\varepsilon)_i^j$ время исполнения i эксперимента, i серии.

Практика проведения исследований показывает, что значения n и m_i могут быть достаточно большими. Например, в одном из проведенных нами исследований n был более 50 и m в диапазоне 10 – 15 на каждую серию. Для полного завершения исследования нам пришлось провести более 500 экспериментов. Учитывая, что сложность имитационной модели в этом исследовании была такова, что требовалось от 15 мин до нескольких часов на эксперимент (в зависимости от исходных данных) на персональном компьютере (на тот момент очень высокопроизводительном), то общая длительность вычислений на этом этапе составила более 300 ч. А это более 10 суток непрерывной

работы компьютера, т.е. вывод очевиден: для реализации исследований такой сложности требуются вычислительные ресурсы существенно превышающие возможности персонального компьютера.

В целом при проведении имитационных исследований, рассматривая все этапы, прослеживаются следующие общие тенденции существенного повышения запросов на вычислительные мощности ($S_{им}$) за счет:

- интеграции исполнения этапов имитационного исследования в рамках одной программной системы. В идеале, это получение САИИ, охватывающей все этапы имитационного исследования;
- распределения функций исполнения отдельных этапов между различными пользователями и в результате создание многопользовательских систем. Например, в САИИ для корпоративных клиентов – одни отвечают за ввод исходных данных и их точность, другие за проведение экспериментов, третьи анализируют полученные результаты;
- обеспечения распределенных вычислений в рамках глобальных систем. Это размещение некоторых сервисов, реализующих отдельные этапы исследования (например, моделирующее ядро) в сети Интернет;
- повышения простоты и доступности взаимодействия пользователя с системой на своем персональном компьютере, в основном за счет использования графики и анимации;
- создания локальных и глобальных баз данных моделей и существенное увеличение их размеров за счет детального мониторинга моделирования;
- 2D и 3D форм представления моделей и результатов.

Таким образом, с точки зрения **архитектуры построения и технологии исследования**, разработки САИИ для получения разумного значения времени имитационного исследования $T_{им}$ должны обеспечить:

- огромную вычислительную мощность для постановки задачи исследования, разработки модели, обработки исходных данных, оперативного проведения множества экспериментов с моделью, хранения, анализа и документирования результатов моделирования. Это может быть не один, а некоторое множество компьютеров;
- оптимальную иерархию вычислений, распределенную между этими компьютерами и пользователями в рамках локальных и глобальных сетей вершиной которых может являться СУПЕР-ЭВМ.

Организация распределенных вычислений в имитационных исследованиях

Функции распределения вычислений между различными компьютерами для увеличения вычислительной мощности программных комплексов начали использоваться уже достаточно давно. Это и применение различных серверов, и создание удаленных хранилищ данных, и подключение более высокопроизводительных компьютеров (например, mainframe) и т.д. Постепенно технологии распределенных вычислений совершенствовалась. В ИМ они тоже используются достаточно давно. Уже появились не только системы ИМ, использующие эти технологии, но и ряд международных стандартов, например, стандарт HLA [10].

В нашей практике имитационных исследований программная реализация распределенных вычислений стала реализовываться несколько лет назад и к настоящему времени подтвердилась эффективность этого подхода. Их применение позволило реально снизить общее время имитационного исследования, понизить программные и технические требования к персональным компьютерам пользователей. Среди разрабо-

танных нами программных средств и алгоритмов, реализующих распределенные вычисления, можно выделить такие новые элементы технологии построения САИИ, как сервер GPSS и системная шина моделирования.

Сервер GPSS обеспечивает и планирует функции удаленного использования одной или нескольких копий GPSS World рядом пользователей как в локальной сети, так и в сети Интернет. Он использовался уже в целом ряде имитационных приложений и позволил решить две важные задачи: вынести «моделирующее ядро» на более высокопроизводительный компьютер (сократив длительность эксперимента с моделью $T(\varepsilon)_i^j$) и уменьшить число приобретаемых Заказчиком лицензий (снизив благодаря этому стоимость имитационного исследования). Схема распределения вычислений и взаимодействия пользователей с сервером показаны на рис. 4.

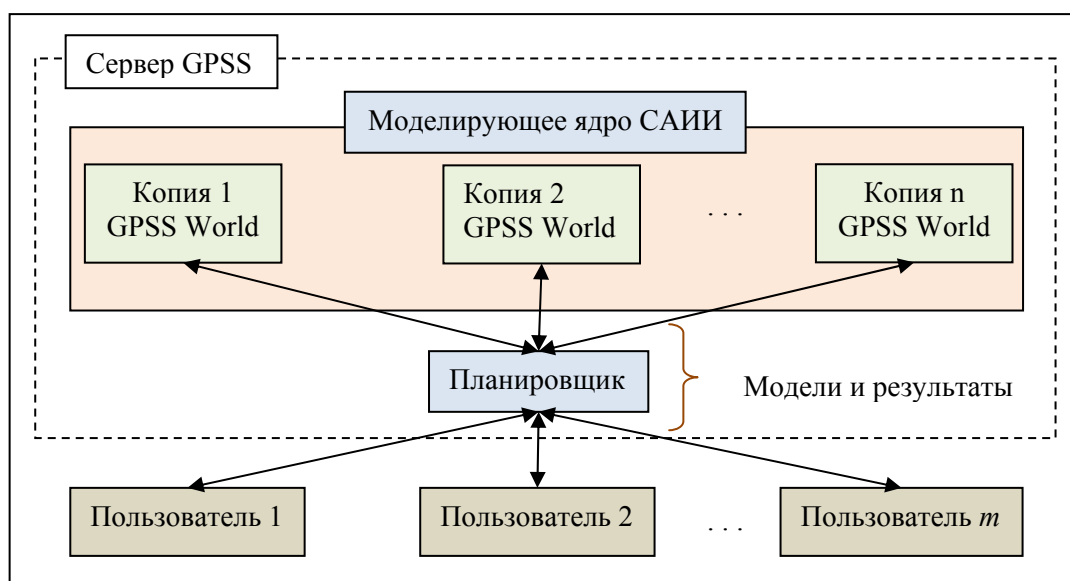


Рис. 4

Следующим практическим шагом стало создание **системной шины моделирования**. Шина, основанная на сервис – ориентированной архитектуре, позволяет обеспечить при разработке и эксплуатации САИИ быстрое и эффективное подключение различных программных сервисов и служб, созданных на различных языках программирования и даже для различных программных и аппаратных платформ. Данная программа также была успешно апробирована при разработке практических имитационных приложений. В самом общем виде архитектура системной шины моделирования показана на рис. 5.

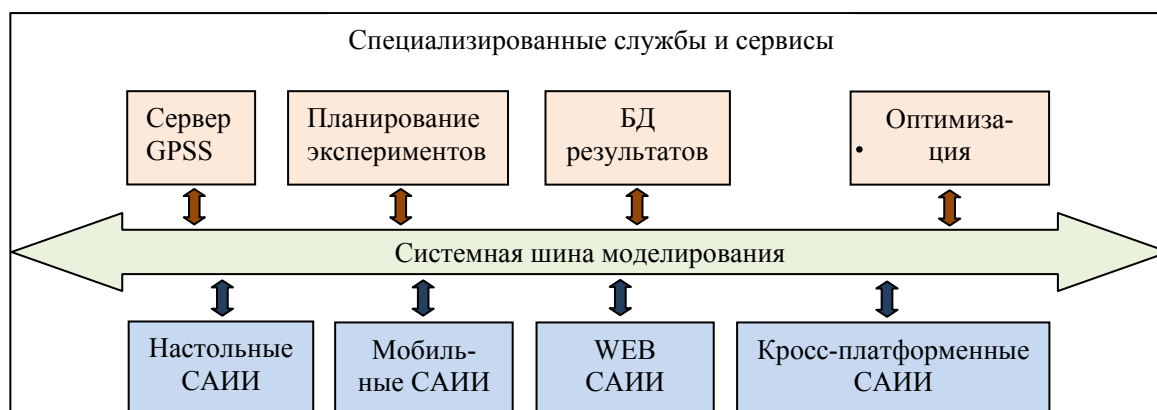


Рис. 5

Приведенная выше архитектура является упрощенной реализацией «вычислений по требованию» облачного моделирования. Интерфейсом облачного САИИ служит системная шина моделирования. Она является связующим звеном между клиентской частью и другими частями САИИ в облачной среде. Все САИИ являются облачными в том смысле, что полный свой функционал по проведению имитационных исследований реализуют только при «подключении» к облаку. Под клиентской частью здесь понимаются различные вычислительные устройства и программы служащие непосредственным инструментом пользователя (то, что он держит в руках) при проведении имитационного исследования. По типу клиентской (пользовательской) части все САИИ можно разбить на «Классические» для настольных ПК и ноутбуков, «Мобильные» для интернет-планшетов, «WEB» реализованные в виде веб-приложений и «Кросс-платформенные».

Ближайшей перспективой в развитии технологий и иерархии имитационных вычислений являются следующие задачи:

- Совершенствование архитектуры высокопроизводительных вычислений. Разработка не упрощенной, а полноценной архитектуры облачного моделирования. Такой проект уже начат и носит условное название GPSS Cloud.
- Практический перенос наиболее сложных сервисов и служб на более мощный вычислительный ресурс – СУПЕР ЭВМ. Тем более, что создаваемые сейчас мощные вычислительные кластеры в ведущих университетах страны и Российской академии наук не загружены, а реальная потребность в вычислительных ресурсах при проведении имитационных исследований очевидна.
- И наоборот, упрощение и перенос клиентской части на более удобные, простые и мобильные вычислительные устройства. Например, планшеты.
- Создание на основе концепции GPSS Cloud виртуальных лабораторий для проведения имитационных исследований и хранения результатов.

Литература

1. **Козлов А. Н., Девятков Т. В., Кейер П. А.** Исследование функционирования центра коллективной обработки информации методом имитационного моделирования // III Всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование, теория и практика» (Санкт-Петербург, 2007 г.): Сб. докладов. Т. 2. С. 96–100.
2. **Власов С. А., Девятков В. В., Усанов Д. И.** Использование имитационных моделей для оценки производственной мощности при управлении металлургическим производством // Автоматизация в промышленности. 2010. № 7. С. 8–13.
3. **Alexandrov V., Sikachev V.** Computer Data Analysis and Modeling: Complex Stochastic Data and Systems // Proc. of the Ninth Intern. Conf., Minsk, Sept. 7–11, 2010. Minsk: Publ. Center of BSU, 2010. Vol. 2. P. 88–91.
4. **Ковалев В. С., Усанов Д. И., Цуцков Д. В., Калинин С. В.** Укрупненная модель железнодорожного направления // III Всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование, теория и практика» (Санкт-Петербург, 2007 г.): Сб. докладов. Т. 2. С. 96–100.
5. **Власов С. А., Девятков В. В., Самойлов В. В.** Имитационное исследование системы сервисного обслуживания программно-технических средств ОАО «Татнефть» // Автоматизация в промышленности. 2007. № 4. С. 11–14.
6. **Власов С. А., Девятков В. В., Девятков Т. В.** Язык моделирования GPSS World и системы автоматизации имитационных исследований: опыт применения и перспективы использования // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Ими-

- тационное моделирование, теория и практика» (Санкт-Петербург, 2009 г.): Сб. докладов. Т. 1. С. 11–18.
7. **Девятков В. В.** Мир имитационного моделирования: взгляд из России // Прикладная информатика. 2011. № 4. С. 9–29.
 8. **Девятков Т. В.** Некоторые вопросы создания систем автоматизации имитационных исследований // Прикладная информатика. 2010. № 5(29). С. 102–116.
 9. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука // Пер. с английского. М.: Мир, 1978. 418 с.
 10. IEEE 1516-2010 – Standard for Modeling and Simulation High Level Architecture – Framework and Rules

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*

А. М. Плотников, Ю. И. Рыжиков, Б. В. Соколов (Санкт-Петербург)

Введение

С 2003 г. каждые два года в Санкт-Петербурге проводятся Всероссийские научно-практические конференции «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках». После каждой из них в «Вестнике технологии судостроения» публиковались обзоры содержания докладов, однако они вследствие специфичности и малого тиража этого уважаемого издания не доводились до большинства актуальных и потенциальных «имитаторов и модельеров» в РФ и за рубежом. Поэтому уроки каждой очередной конференции оказывали недостаточное влияние на содержательность последующей. Кроме того, за истекшее десятилетие существенно обновился и расширился круг исследователей, активно работающих в данной области. Учитывая изложенное, Организационный и Программный комитеты решили выпустить аналитический обзор, в котором итоги конференций были бы подведены и осмыслены с разных точек зрения: по используемым методам моделирования, инструментальным средствам, практическим приложениям. В обзор включены – с упреждением – и материалы ИММОД-2011. Полная версия обзора представлена SD и из-за ее достаточно большого объема в «Трудах конференции...» [1–5] мы предлагаем только отдельные положения указанного обзора. Авторы надеются, что все перечисленные обстоятельства позволят обсуждать представленные на проводимой конференции доклады более целенаправленно.

Предлагаемый обзор подготовлен тремя членами Программного комитета, однако не является официальной точкой зрения комитета в целом. Громадный объем анализируемого материала не позволил упомянуть в нем все доклады. Надеемся, что читатели обзора отнесутся к этому с пониманием. Для экономии места ссылки на доклады сведены к минимуму, как правило, даются по фамилии первого автора.

1. Общая оценка результатов проводимых конференций

Начиная с 2003 года в России каждые два года проводится Всероссийская научно-практическая конференция «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках» (ИММОД).

Цель проводимых конференции состояла в распространении и конструктивном использовании методов и средств имитационного моделирования сложных объектов (технических, технологических, экономических, социальных, комбинированных) для решения широко спектра актуальных научных и практических задач, активизация творческой деятельности и укрепления научно-производственного потенциала Российской Федерации.

В основные задачи конференции входят:

- развитие и обобщение теории имитационного и системного моделирования сложных объектов, квалиметрии моделей и полимодельных комплексов;
- обмен опытом и обсуждение результатов исследований и практических приложений имитационного моделирования;

* Данная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 05–07–90088, № 10-07-00311, 10-08-90027-Бел_а, 11-08-01016, 11-08-00641, 10-08-00906), Института системного анализа РАН (проект 2.3).

- обмен опытом применения имитационного и комплексного моделирования для решения научных и практических задач;
- распространение опыта обучения теории и практике имитационного и комплексного моделирования.

Научная программа конференций включает тематические направления:

- теоретические основы и методология имитационного и комплексного моделирования;
- методы оценивания качества моделей и полимодельных комплексов;
- методы и системы распределенного моделирования;
- моделирование глобальных процессов;
- средства автоматизации и визуализации имитационного моделирования;
- системная динамика (с наличием имитационной составляющей);
- практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования;
- имитационное моделирование в обучении и образовании.

В 2003 году учредителем конференции выступил ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения» (ФГУП «ЦНИИ ТС»). У последующих конференций два постоянных учредителя – ФГУП «ЦНИИ ТС» и Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН), Санкт-Петербург.

Все конференции проводились в Санкт-Петербурге, в октябре месяце. Первые три конференции – в ФГУП «ЦНИИ технологии судостроения», четвертая и пятая – проведены в Доме Ученых им. М. Горького (Дворцовая наб., 26).

Средняя ежедневная посещаемость конференций составила: 2003 год – 105 чел., 2005 год – 108 чел., 2007 год – 94 чел., 2009 год – 102 чел.

Тематика конференции традиционно разбивается на три основных направления, которым соответствуют три секции:

- теоретические основы и методология имитационного и комплексного моделирования.
- практическое применение имитационного и комплексного моделирования и средств автоматизации моделирования.
- средства автоматизации и визуализации имитационного моделирования.

Информационную поддержку конференциям оказывали компании ООО «Элина-Компьютер» (Казань) и XJ Technologies (Санкт-Петербург), журналы «Судостроение», «RM Magazine», «Rational Enterprise Management» (Санкт-Петербург) и «Прикладная информатика» (Москва).

Спонсорскую помощь в проведении конференций оказывали компании «Би-Питрон» и XJ Technologies (Санкт-Петербург), Комитет по науке и высшей школе Администрации Санкт-Петербурга (Санкт-Петербург), ООО «Сименс Продакт Лайфсайкл Менеджмент Софтвер», Президиум РАН, АНО «Ремесленная академия», Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН, Российский фонд фундаментальных исследований (Москва).

В проводимых пяти конференциях приняли участие представители девяти стран – России, Украины, Белоруссии, Казахстана, Латвии, Германии, Болгарии, Вьетнама и Индии.

При подготовке конференций использовались информационные ресурсы сайтов www.gpss.ru, www.sstc.spb.ru, www.spiiras.nw.ru, www.simulation.org.ua, www.xjtek.com.

Статистика докладов конференций отражена в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Категория докладов	2003 ¹	2005	2007	2009	2011
Пленарные доклады	5	8	6	7	8
Доклады секции 1	40	19	38	29	31
Доклады секции 2	–	27	12	28	29
Доклады секции 3	34	53	45	59	38
Стендовые доклады и демонстрации	27	33	17	14	57
Всего докладов	108	140	118	137	
Всего упоминаемых авторов докладов	143	181	205	236	260

Статистика по авторам докладов и слушателям конференции отражена в табл. 2. В работе конференции 2003 года приняли участие специалисты, руководители, предприниматели, менеджеры и научные работники 32 городов России, Украины, Латвии и Германии; в работе конференции 2005 года – из 37 городов России, Украины, Беларуси, Латвии и Германии; в работе конференции 2007 года – из 37 городов России, Украины, Беларуси, Германии, Вьетнама и Индии; в работе конференции 2009 года – из 49 городов России, Украины, Беларуси, Казахстана, Болгарии, Вьетнама, Латвии и Германии, в работе конференции 2011 года – из 54 городов России, Украины, Беларуси, Казахстана, Вьетнама, Латвии и Германии.

Таблица 2

Звание, степень	2003	2005	2007	2009	2011
Член-корреспонденты, академики	1	2	2	4	2
Доктора наук	23	36	40	39	48
Кандидаты наук	40	43	59	65	37
Аспиранты	20	30	35	55	36
Студенты	11	8	12	22	39

В работе пяти конференций приняли участие представители более двухсот организаций, предприятий, фирм и высших учебных заведений России и зарубежных стран.

Конференции в целом были четко организованы, проходили на хорошем уровне и при большой заинтересованности участников. Труды конференции издавались до их начала. На каждой из конференций делалось 5–8 докладов на пленарном заседании и около 100 на трех секциях – теоретической, инструментальной и прикладной. Представлялось по несколько десятков секционных докладов. Почти все доклады были оформлены в виде компьютерных презентаций; многие секционные и стендовые доклады сопровождалась эффектными и поучительными анимациями – в частности, одновременным появлением отдельных частей слайда. Из участников конференции сформировалось устойчивое сообщество единомышленников. Всем докладчикам задавались вопросы, и выдерживание регламента требовало немалых усилий руководителей секций. На итоговом заседании первой конференции было принято решение впредь проводить такие конференции регулярно и изучить вопрос о придании им статуса международных (впрочем, и на уже проведенных были представлены докладчики из Латвии, Германии и США, не говоря о странах СНГ).

На общую дискуссию выносились: научные аспекты конференций, состояние и перспективы имитационного моделирования в России, проблемы продвижения методов

¹ Конференция 2003 года состояла только из двух секций.

имитационного моделирования в отечественную промышленность. На первой же конференции было решено создать Российское общество имитационного моделирования, поручить Оргкомитету создать инициативную группу, доработать и согласовать с потенциальными учредителями пакет учредительных документов и юридически оформить общество.

В результате проделанной Организационным и Программным комитетами большой работы 28 февраля 2011 г. Министерством Юстиции РФ было выдано Свидетельство о государственной регистрации некоммерческой организации – некоммерческого партнерства “Национальное Общество Имитационного Моделирования” (НОИМ). Президентом общества стал член-корреспондент РАН Юсупов Рафаэль Мидхатович, Председателем правления общества был избран Плотников Александр Михайлович. В настоящее время ведется активная подготовительная работа по приему новых физических и юридических лиц в состав НОИМ.

2. История и общие предпосылки становления и развития имитационного моделирования в Российской Федерации

К настоящему времени теория, методы и технологии создания (использования) различных классов моделей развиты достаточно хорошо. Исследования в этой отрасли научных знаний продолжают с неослабевающей интенсивностью, охватывая всё новые и новые классы моделей и предметные области. На проводимых конференциях постоянно отмечались исторические аспекты становления имитационного моделирования (ИМ) в нашей стране [6–13].

Появление имитационных моделей (ИМл) и имитационного моделирования, а также и превращение их в эффективное средство анализа сложных и больших систем было, с одной стороны, обусловлено потребностями практики, а с другой стороны, развитием метода статистических испытаний (метод Монте-Карло), открывшего возможность моделировать случайные факторы, которые существенно влияют на процесс функционирования систем. Кроме того, была создана материальная (аппаратурная) база для реализации ИМл – мощные вычислительные средства второго и третьего поколений.

Введение понятия ИМ в науке (начало 60-х годов) было сопряжено с возникновением определенной терминологической путаницы, разнообразием трактовок этого понятия. Одна из причин, повлиявших на это, связана с тем, что сам термин, обозначаемый в англоязычной литературе как *simulation* (лат. *simulation* – симулирование, уподобление) и введенный в отечественной литературе как «имитационное моделирование» (лат. *imitation* – подражание, имитация), неудачен с чисто лингвистической точки зрения, поскольку в первом случае его можно перевести просто как «моделирование», а во втором – истолковать в тавтологическом смысле, рассматривая термины «имитация» и «моделирование» как синонимы («моделирующее моделирование»). В действительности, когда речь идет об ИМ, то имеется в виду моделирование особого рода, противостоящее в известном смысле аналитическому моделированию. Последнее связано с двумя основными обстоятельствами: во-первых, имитационная модель должна с необходимой полнотой воспроизводить как структуру объекта-оригинала, так и его функционирование (при обязательном сохранении схожести поведения по отношению к объекту-оригиналу); и, во-вторых, ИМ ориентируется на получение знаний о прототипе не путем аналитического исследования или однократных численных расчетов, а путем целенаправленных экспериментов на ИМл.

На конференциях постоянно отмечались давние и хорошие традиции использования и развития моделирования в СССР в период 1960–1990 гг.: созданы многочисленные научные школы; получен ряд важнейших фундаментальных и практических ре-

зультатов, к числу которых можно, в первую очередь отнести разработку методологических основ ИМ, создание и широкое использование в различных предметных областях таких языков автоматизации моделирования как СЛЭНГ, НЕДИС, СТАМ и др., система агрегативного моделирования Н.П. Бусленко. Семейство GPSS, SIMULA, GASP, CSL и другие языки моделирования были адаптированы к применявшейся в стране вычислительной технике. Они широко использовались в реальном секторе экономики [13–18].

Развал страны и «демократические» реформы привели к утрате связей между научными коллективами и отдельными учеными, прекращению активной деятельности многими из них, нарушению преемственности поколений, приостановке или прекращению ряда перспективных разработок. Умирающая промышленность утратила интерес к практическому моделированию, что иссушило внебюджетные ручейки финансирования исследований.

Однако наметившийся за последнее десятилетие рост экономики взбодрил оставшихся (главным образом в вузах) энтузиастов моделирования, оживил их интерес к преподаванию моделирования, теоретическим исследованиям и прикладным разработкам. В настоящее время 150 вузов России ежегодно выпускают более 10 тыс. специалистов, знакомых с основами компьютерного моделирования. Аналогично обстоит дело и в странах СНГ. Моделирование введено в учебные планы не только компьютерных, но и ряда экономических специальностей. В сети Интернет появились сайты, посвященные этой проблеме (gpss.ru, simulation.org.ua, gpss-forum.narod.ru), разработан исследовательский портал «Имитационное моделирование». В пленарных докладах (А.В. Борщев, Н.Н. Лычкина, Б.В. Соколов [2, 3, 4]) отмечался заметный рост интереса бизнес-сообщества к проблемам имитации и оптимизации производственных и иных экономических процессов. Воспринята, наконец, старая идея интерактивной технологии программирования с разработкой «быстрого прототипа». Внедрение объектно-ориентированного программирования, появление визуальных конструкторов ускорило и удешевило разработки. Интенсивно развивались многоагентное, агрегативное и распределенное моделирование. Была создана российская система гибридного моделирования AnyLogic.

Продолжались работы на стыке теории массового обслуживания (теории очередей) и имитационного моделирования. Разработанные модели включались в контур оперативного управления. На прошедших конференциях звучали интересные предложения (распределенное моделирование с использованием Интернета, учет психофизиологических особенностей оператора, акцент на использование модели в качестве средства убеждения заказчиков).

Тематика ИМ в настоящее время введена в учебные планы не только компьютерных, но и ряда экономических специальностей. Открыта подготовка специалистов по информационным технологиям применительно к основным областям применения. Дисциплина «Моделирование систем» из разряда специальных перешла в общепрофессиональные, т. е. стала «ближе к массам». Издан ряд учебников, из которых написанные Ю.Г. Карповым, Ю.И. Рыжиковым и В.Н. Томашевским распространялась на конференциях.

Мировая наука и экономика в трудные для России последние десятилетия не стояли на месте и интенсивно развивались. За рубежом регулярно проводились конференции по теории и практическим аспектам имитационного моделирования; оно все шире внедрялось в практику проектирования производственных (в самом широком смысле слова) процессов и оперативного управления ими. В повестку дня встал вопрос о сплошном применении цифровых моделей (Digital Factory) в процессе проектирования и эксплуатации производственных систем. Люди, участвующие в такой деятельно-

сти, получают возможность наблюдать статические объекты – как правило в виде трехмерных изображений (виртуальная реальность – VR). Наличие имитационной модели и обоснование с ее помощью выбранного варианта в западных странах являются обязательными в комплекте документов, подаваемых на рассмотрение для проектирования или модернизации нового производства либо технологического процесса. Модели используются и для обучения персонала. Эта концепция называется e-manufacturing. Убежденными сторонниками ее являются, в частности, ведущие автомобильные компании: Daimler-Chrysler, Mercedes-Benz, BMW, Audi, Toyota. Этот подход применяется и на сборке аэробусов А-380 в Гамбурге. Ряд фирм выпускает программные продукты как широкого назначения (с предполагаемой модификацией), так и специализированные по логистике, отраслям промышленности и социальной сферы. Однако в условиях чрезвычайной сложности и дороговизны этих разработок из европейских компаний только Technomatics и DELMIA претендуют на полное покрытие e-Manufacturing своими продуктами. Наблюдается тенденция перехода от разработки «самодельных» (пусть даже усилиями мощных промышленных фирм) систем моделирования к заказу их профессиональным разработчикам моделей.

В обзорных докладах на прошедших конференциях [4] отмечались типичные недостатки разработанных систем моделирования:

- трудоемкость моделирования;
- сложность проведения экспериментов;
- слабость средств моделирования конфликтов за общие ресурсы;
- отсутствие поддержки русского языка.

Недостатки имитационного моделирования вынуждают комбинировать его с аналитическими моделями. Поскольку наиболее широкий класс моделей, охватывающий сборочное производство, транспортные системы, системы логистики, разного вида обслуживающие и коммуникационные системы – это по сути сети массового обслуживания, активно разрабатываются и такие модели и алгоритмы.

Конференция 2007 г. (Девятков В.В., Кобелев Н.Б. и др.) [3, 4] соотнесла с современным мировым уровнем состояние такого важнейшего научно-технического направления в России как электронная готовность страны. Последняя представляет собой обобщенную оценку примерно ста показателей, характеризующих общий интеллектуальный уровень принимаемых решений. Регулярный мониторинг тенденций интеллектуального развития, проводимый в рамках специальной программы ООН по 159 странам в 2005 г., поставил электронную готовность России на 126-е место. Наш рейтинг по сравнению с 2004 г. упал на 36 пунктов, что свидетельствует о крайне негативной тенденции (между прочим, уровень коррупции имеет сильную отрицательную корреляцию с электронной готовностью).

Факты снижения интеллектуальности безусловно имеют место. В стране не осуществляется расчет межотраслевого баланса продукции и услуг, в силу чего никто точно не знает, что нужно стимулировать, а что не нужно. Нет существовавшего в советские времена единого плана развития и размещения производительных сил страны по отраслям и регионам. Несбалансированная промышленность производит более дорогую и неконкурентоспособную продукцию. Продавлена вузовская реформа, понижающая уровень подготовки специалистов до теперешнего уровня нашей экономики и гарантирующая стагнацию последней. Работы по теории и разнообразным применениям имитационного моделирования (ИМ), которые могли бы повысить интеллектуальность и обоснованность принимаемых решений, ныне проводятся лишь несколькими сотнями оставшихся энтузиастов. В то же время в США на работы, связанные с ИМ, тратятся десятки млрд. долларов в год. ИМ принимаемых решений, проектов развития и технологий постоянно применяется такими компаниями, как Boeing, Compaq, Xerox, IBM, Intel, Lockheed, Motorola, General Motors,

Ford, Standard Oil, Cray Research и многими другими, а также рядом правительственных организаций (Агентство национальной безопасности, BBC, ВМФ, NASA). В докладе Ю.А. Меркурьева [4, 23–26] были перечислены журналы и конференции – европейские и мировые, в том числе мультikonференции (многотемные): агентно-ориентированные; теория моделирования; высокопроизводительные вычислительные системы; военное моделирование; развитие городов. Центральное место здесь занимают Зимние конференции по ИМ (США). В данном докладе были указаны также электронные ресурсы, где располагается основная информация о конференциях по ИМ.

В целом на прошедших конференциях отмечалось, что в РФ наметился выход из кризиса в области ИМ. Это было наглядно было показано в работе [7] и последующих докладов соответствующих авторов на конференциях [1–5], в которых в качестве аргументов, подтверждающих данные положения, были приведены следующие факты:

1. *Индикатором резко возросшей активности специалистов ИМ является появление серьезных информационных ресурсов, посвященных ИМ, в сети Internet.* Среди них www.xjtek.ru, www.gpss.ru, www.simulation.org.ru, www.gpss-forum.narod.ru и др.

2. *Постоянно увеличивается академическое применение ИМ.* Благодаря энтузиазму и терпению преподавателей многих ВУЗов, удалось сохранить основной костяк специалистов по ИМ высокой квалификации. В стандарты ряда образовательных специальностей в России введены курсы: «Моделирование систем», «Имитационное моделирование», «Компьютерное моделирование».

3. *Появилось гораздо больше публикаций по тематике имитационного моделирования.* Причем это относится не только к трудам симпозиумов и конференций, но и к журнальным статьям и монографиям.

4. Повсеместно в РФ *появляются компании, профессионально занимающиеся ИМ.* Среди них B-Club Engineering (г. Иваново, www.b-club.ru), «Элина-компьютер» (г. Казань, www.elina-computer.ru), Департамент имитационного моделирования компании IBS (г. Москва, www.ibsd.ru), Ленгипромез (Санкт-Петербург), Новые исследования и разработки проводятся в РАН: Вычислительный центр РАН, ИПУ РАН, ИСА РАН, ИППИ РАН, ИПИ РАН, СПИИРАН, институты СО РАН и др.

5. *Появился целый ряд российских разработок, конкурентоспособных на мировом рынке* (табл. 3).

Таблица 3

Пример инструментальных средств ИМ, разработанных в России

№	Наименование	Данные о разработчике
1	Имитационная платформа Фантомат	Департамент систем имитационного моделирования IBS, г. Москва, Дмитровское ш., 9-б, www.libs.ru
2	Профессиональный инструмент моделирования Any-Logic	Экс Джей Текнолоджис, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 21, www.xjtek.com
3	Интерактивная система ИМ ISS2000	Национальный технический университет «Киевский политехнический институт», Украина, г. Киев (автор Томашевский В.Н.)
4	Распределенная система ИМ для локальной сети в среде QNX (ОС семейства UNIX)	Институт вычислительной математики и математической геофизики (вычислительный центр), г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 6, http://www/sscc.ru
5	Система ИМ СМО	Томский политехнический университет, (автор – Ослин Б.Г.)
6	Общелевая система ИМ Object GPSS	Северодонецкий технологический институт, г. Северодонецк, Украина (автор – Королев А.Г.)

6. Наблюдается появление практического интереса к ИМ в реальном секторе экономики. На ряде предприятий были выполнены или выполняются серьезные проекты с применением ИМ.

7. В 2011 году было образовано некоммерческое партнерство “Национальное Общество Имитационного Моделирования” (НОИМ).

В целом на прошедших конференциях отмечалось, что несмотря на то, что к настоящему времени в РФ в рассматриваемой предметной области (имитационное и комплексное моделирование сложных объектов и систем) были получены важные теоретические и практические результаты, из-за целого ряда объективных и субъективных причин (методологических, технологических, финансовых, образовательных и т. п.) при создании и применении ИМл допускается множество ошибок и некорректностей, а эффективность использования ИМл, к сожалению, продолжает оставаться низкой, еще достаточно слабо учитываются возможности современных интеллектуальных информационных технологий при организации и проведении ИМ.

3. Современное состояние и проблемы развития имитационного моделирования в Российской Федерации

В обзорном докладе на конкретных примерах будут представлены основные проблемы ИМ и возможные пути выхода из них, которые предлагались участниками прошедших конференций ИММОД в 2003–2011 годах. В качестве таковых были рассмотрены следующие основные проблемы [1–3, 14–22]:

Проблема оценивания степени адекватности имитационных моделей

Одной из центральных проблем теории математического моделирования сложных организационно-технических систем (СОТС) в целом и ИМ указанных систем в частности заключается в обеспечении требуемой степени адекватности рассматриваемого класса моделей по отношению к моделируемым объектам-оригиналам $Ob_{<>}^{op}$. Данное требование является обязательным для любых случаев построения моделей и моделирующих систем. При этом очевидно, что на практике следует говорить не о полной адекватности, а лишь об адекватности в некотором смысле (о требуемом уровне адекватности). Для СОТС одна модель может отражать лишь какую-либо сторону, аспект прототипа, и поэтому понятие адекватности "вообще" для такой модели не существует, речь может лишь идти об адекватности отражения данного аспекта. Следует всегда оценку степени адекватности проводить с учетом того, в какой степени на данной модели могут быть достигнуты цели, поставленные при исследовании каждого конкретного вопроса, для решения которого необходимо прибегать к моделированию.

Причинами неадекватности ИМл некоторого объекта оригинала $Ob_{<>}^{op}$ (в нашем случае – СОТС) могут быть неточные исходные предпосылки в определении типа и структуры моделей, погрешности измерений при проведении испытаний (экспериментов), вычислительные погрешности при обработке измерительной информации. Использование неадекватной модели может привести к значительным экономическим потерям, аварийным ситуациям, к невыполнению задач, поставленных перед реально существующей системой.

Проблема обеспечения гармоничного взаимодействия пользователей с вычислительной средой, в рамках которой реализуются ИМл (создание интеллектуального интерфейса).

Опыт эксплуатации различных классов интегрированных систем поддержки принятия решений (ИСППР) показывает, что формализованные модели (прежде всего математические модели) не позволяют в полной мере учесть все многообразие возможных вариантов функционирования СОТС. Поэтому особую актуальность начинает при-

обретать вопрос объединения формализованных процедур анализа и выбора, реализованных в рамках соответствующих ИМл, входящих в состав ИСППР, и творческих возможностей пользователей.

Проблема обеспечения открытости имитационных моделей и комплексов (ИМлК) и их способности к адаптации, самоорганизации и развитию.

Анализ процессов создания, эксплуатации и совершенствования СОТС показывает, что "внешняя среда", с которой взаимодействует СОТС, постоянно изменяется, это, в свою очередь приводит к изменению параметров и структур указанных объектов. В этих условиях, разработанные на различных этапах с различными целями ИМл и комплексы, а также методы и алгоритмы манипулирования данными моделями могут лишь приближенно отражать необходимые свойства исследуемых элементов и подсистем СОТС.

Создание универсальных моделей и алгоритмов, реализующих, например, все основные функции управления СОТС применительно к различным предметным областям, также затруднено. Поэтому реально на практике в зависимости от складывающейся обстановки должен конструироваться или выбираться наиболее пригодный в силу своих свойств вариант ИМл (входящий в состав ИСППР) и соответствующий ему алгоритм решения той или иной задачи автоматизированного управления СОТС. Таким образом, СОТС и ее ИСППР, находящиеся в условиях воздействия нестационарной внешней среды, только тогда будут способны обеспечивать выработку эффективных плановых и регулирующих воздействий, когда будут наделены особыми механизмами (процедурами) адаптации и, в перспективе, самоорганизации, обеспечивающими целенаправленное изменение параметров моделей и самих моделей и алгоритмов ИСППР с учетом возможных вариантов выдачи управляющих воздействий в будущем, что позволяет, в конечном осуществлении приспособления СОТС к будущему развитию как объектов управления, так и внешней среды. Конструирование или выбор типа ИМл и алгоритма ИСППР должны являться функцией специально выделенной подсистемы (адаптера), входящей в состав ИСППР. С помощью данного адаптера путем проведения параметрической и структурной адаптации (а в перспективе и самоорганизации) соответствующих компонент СПМО обеспечивается согласование свойств СОТС со средой, что позволяет сократить до минимума число ситуаций, при которых ИСППР не сможет выдать рекомендации по управлению СОТС на различных этапах их жизненного цикла.

Адаптация рассматриваемых СОТС, ИСППР предполагает адаптацию к "прошлому" и к "будущему". Для реализации указанных механизмов адаптации необходимо чтобы в составе ИСППР имелись такие процедуры, которые обеспечивали накопление и сохранение уникального опыта работы органов управления, выявление закономерностей течения процессов управления, фиксацию этого опыта в формализованном виде: либо в форме алгоритмов переработки информации о компонентах вектора состояния СОТС, либо в виде параметров законов управления, или в форме решающих правил (алгоритмов) принятия рациональных решений, либо в форме записей в базе данных или базе знаний. Среди частных проблем, связанных с созданием и применением ИМлК, можно отнести:

а) проблему обеспечения простоты и оптимальности построения каждой конкретной имитационной модели. Данная проблема непосредственно связана с проблемой обеспечения необходимой степени адекватности моделирования. В самом деле, для достижения необходимой степени адекватности иногда приходится идти на существенное усложнение модели, построения вместо одной модели целого моделирующего комплекса. Однако даже в этом случае, если существует возможность выбора между различными классами моделей (либо комбинациями этих моделей), позволяющими обеспечивать примерно одинаковую степень адекватности моделирования, очевидно, из

этих моделей целесообразно выбирать наиболее простую. В этом и состоит суть оптимальности построения (выбора) моделей.

б) проблему обеспечения эффективной машинной реализации ИМл. Решение данной проблемы, прежде всего, предполагает обеспечение высокой эффективности реализации вычислительного процесса, организованного с учетом конкретных свойств разработанных моделей и алгоритмов (степени связности алгоритмов, возможности распараллеливания счета при решении задач, решение задач в оверлейных режимах).

в) проблему обеспечения возможности моделирования с различными масштабами времени;

г) проблему нахождения обоснованного компромисса между универсальностью и проблемной ориентацией ИМлК.

4. Замечания по содержанию и научно-практическому уровню докладов

Проводимые конференции ИММОД по своему статусу должны быть достойны публикации материалов, отвечающих уровню кандидатских и докторских диссертаций. Это налагает соответствующие обязательства, как на докладчиков, так и на Программный комитет, обязанный «держать планку» достаточно высоко.

При общем достойном уровне конференций по содержанию и форме некоторых докладов приходится сделать ряд серьезных замечаний. Программный комитет предлагает в качестве камертона для настройки докладчиков цитату из выступления одного из спонсоров и активному участнику конференций – А.В. Борщева (XJ Technology): «Преподаватели, студенты и аспиранты часто увлекаются, например, созданием собственных симуляторов или, хуже того, разводят заумное и занудное теоретизирование вокруг понятия "модель"...Важны выступления не просто в своей академической тусовке, а там, где Вас может услышать заинтересованный практик, и разговоры о не том, что сети Петри с раскрашенными фишками лучше, чем с нераскрашенными, а про то, на сколько процентов сократится время ожидания грузовика на въезде в контейнерный терминал – если принять такие-то решения, подсказанные имитационной моделью».

В обзоре критические замечания сведены в ряд подразделов, среди которых были выделены замечания связанные с бессодержательностью докладов, несоответствием тематики докладов проблематике конференции, формулировкой глобальных претензий, содержательной неполнотой докладов, «обурбачиванием» проблем ИМ, банальностями и переоткрытием известных результатов, философской несостоятельностью, математическим невежеством, дефектами оформления и представления полученных результатов.

Заключение

Программный комитет конференции ИММОД-2011 при подготовке данной конференции постарался учесть все ранее высказанные критические замечания. Поэтому одна из основных задач данной конференции состоит в том, что, во-первых, при ее проведении учесть все ранее высказанные предложения по повышению качества представляемых докладов и, во-вторых, определить наиболее перспективные пути дальнейшего решения перечисленных проблемы теории и практики имитационного и комплексного моделирования.

Литература

1. Плотников А. М., Рыжиков Ю. И. Первая всероссийская научно-практическая конференция ИММОД-2003. Итоги и перспективы // Вестник технологии судостроения. 2004. №12. С. 69–73.
2. Плотников А. М., Рыжиков Ю. И. Первая всероссийская научно-практическая конференция ИММОД-2005. Итоги и перспективы // Вестник технологии судостроения. 2006. №12. С. 69–73.

3. **Плотников А. М., Рыжиков Ю. И.** Первая всероссийская научно-практическая конференция ИММОД-2007. Итоги и перспективы // Вестник технологии судостроения. 2008. № 12. С. 69–73.
4. Материалы 1-й, 2-й, 3-ей, 4-ой Всероссийской научно-практической конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика”. Т. 1–2. СПб.: ФГУП “ЦНИИ технологий судостроения”, 2003, 2005, 2007, 2009.
5. Труды 5-й Всероссийской научно-практической конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика”. Т. 1–2. СПб.: ФГУП “ЦНИИ технологий судостроения”, 2011.
6. **Аврамчук Е. Ф., Вавилов А. А., Емельянов С. В. и др.** Технология системного моделирования / Под общ. ред. С.В.Емельянова. И.: Машиностроение, 1988.
7. **Власов С. А., Девятков В. В.** Имитационное моделирование в России: прошлое, настоящее, будущее // Автоматизация в промышленности, 2005, №5. стр. 63–65.
8. **Калашников В. В., Немчинов Б. В., Симонов В. М.** Нить Ариадны в лабиринте моделирования. М.: Наука, 1993. 192 с., ил.
9. **Краснощёков П. С., Петров А. А.** Принципы построения моделей. М.: Фазис, 2000. 400 с.
10. **Месарович М., Такахара Я.** Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978.
11. **Бусленко Н.П.** «Моделирование сложных систем», М., «Наука», 1968.
12. **Нейлор Т.** «Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем». М.: Мир, 1975. 500 стр.
13. **Шеннон Р.** «Имитационное моделирование систем – искусство и наука». М.: Мир, 1978. 418 стр.
14. **Карпов Ю.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
15. **Ростовцев Ю. Г., Юсупов Р. М.** Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1991. № 7, С. 7–14.
16. **Рыжиков Ю. И., Плотников А. М.** Вторая всероссийская научно-практическая конференция ИММОД-2005. // Вестник технологии судостроения. 2006. №16. С. 67–73.
17. **Савин Г. И.** Системное моделирование сложных процессов. М.: Фазис, 2000.
18. **Самарский А. А., Михайлов А. П.** Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
19. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Теория систем и управления, 2004, № 6. С. 5–16.
20. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
21. **Юсупов Р. М.** Элементы теории испытаний и контроля технических систем: / Под ред. Р.М. Юсупова. М.: Энергия, 1977. 189 с.
22. **Юсупов Р. М., Иванищев В. В., Костельцев В. И., Суворов А. И.** Принципы квалиметрии моделей // IV СПб Международная конференция «Региональная информатика-95», тезисы докладов. СПб, 1995. С. 90–91.
23. 21st European Conference on Modelling and Simulation, June 4–6, Prague, Czech Republic, Proceedings, 2007, Prague 826 pp.
24. <http://www.wintersim.org>
25. <http://www.scs.org>
26. <http://www.liophant.org/scsc>

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОХРАНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ БОЛЬШИХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ОЗЕР И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Л. А. Руховец (Санкт-Петербург)

Проблема дефицита пресной воды на планете хорошо известна. Уже сейчас около 2 млрд жителей планеты живет в условиях водного дефицита. Более того, дефицит пресной воды будет только увеличиваться, если сохранятся современные тенденции в водопотреблении и не изменится характер водопользования. Огромна антропогенная нагрузка на водные ресурсы суши. Согласно имеющимся прогнозам [2, 3], к 2025 году количество потребляемой пресной воды может достичь уровня имеющихся экономически доступных запасов. Можно сказать, что проблема дефицита пресной воды более острая, чем проблема с запасами углеводородов.

В нашей стране нет проблемы дефицита пресной воды, Россия занимает второе место в мире по объему пресноводного стока. Однако достаточно остро стоит проблема качества пресной воды.

Одним из значимых запасников пресной воды являются крупнейшие озера, такие как Байкал, американские Великие озера, крупнейшие озера Европы – Ладожское и Онежское.

Для сохранения водных ресурсов суши можно выделить следующие важнейшие проблемы – определение уровней допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты и сохранение водных экологических систем, которые и поддерживают качество воды.

Для определения допустимой антропогенной нагрузки, для сохранения устойчивости водных экосистем Ладожского и Онежского озер были созданы математические модели.

Первые модели экосистемы Ладожского озера были созданы В.В. Меншуткиным и О.Н. Воробьевой в 1987 году [6] и А.В. Леоновым, М.М. Остапенко и Е.Н. Лаптевой в 1990 году [5].

Позднее в период 1998–2010 гг. в Санкт-Петербургском экономико-математическом институте РАН сотрудниками института Г.П. Астраханцевым, Т.Р. Мининой, В.Н. Полосковым во главе с директором Л.А. Руховцом были созданы модели гидротермодинамики и модели экосистемы Ладожского и Онежского озер [1, 12]. В создании моделей принимали участие Н.А. Петрова – сотрудница Института озераведения РАН и В.В. Меншуткин – один из пионеров создания моделей экосистем озер, в настоящее время также сотрудник СПб ЭМИ РАН. В создании моделей для Онежского озера принимали участие Н.Н. Филатов – директор Института водных проблем Севера Кар.НЦ РАН и сотрудник этого института А.Ю. Тержевик.

Приведу перечень созданных моделей.

Трехмерные модели для Ладожского озера:

- модель гидротермодинамики Ладожского озера; воспроизводит круглогодичную циркуляцию озера – систему течений и температурный режим (1998–2003);
- модель, основанная на круговороте азота и фосфора (1992);
- базовая модель, основанная на круговороте фосфора (1998);
- модель, имеющая три трофических уровня (1998);
- модель, включающая зообентос (2003);
- модель сукцессии фитопланктона (2003);
- комплексная модель экосистемы Ладожского озера (2008);
- новая версия модели сукцессии (2010).

Трехмерные модели для Онежского озера:

- модель гидротермодинамики Онежского озера (2002);
- модель экосистемы Онежского озера (2005);
- модель распространения загрязнений (2004);
- модель распространения нефти по поверхности водоема (2002);

Все эти модели трехмерные, кроме модели распространения нефти по поверхности водоема. Модели реализованы на сетках с достаточно высоким разрешением по вычислительным алгоритмам, созданным Г. П. Астраханцевым и Л. А. Руховцом [1, 9,10].

Относительно создания моделей приведу несколько общих замечаний. В значительной степени они относятся к моделям живой природы. В данном случае – к моделям водных экосистем. Тем не менее, их можно отнести и к любым моделям. Эти замечания достаточно очевидны, но мне представляется полезным их напомнить.

- При создании математических моделей обычно используются данные и знания о моделируемых объектах, процессах или явлениях, имеющиеся на момент создания моделей, то есть данные и знания из прошлого и настоящего. Это, несомненно, следует учитывать при прогнозировании. То, что связано с изменениями внешних воздействий и что не меняет структуру модели, зачастую воспроизводится адекватно. Однако изменения в структуре модели или возникновение взаимодействий, неизвестных при создании модели, может приводить к неадекватности результатов моделирования реальности.

- При обсуждении результатов моделирования или самих моделей очень часто создателям моделей предъявляются претензии по поводу того, что в модели не учтены те или иные аспекты процессов или явлений. Нам представляется, что наиболее значимым аргументом является суждение о том, что модель непременно должна быть существенно проще изучаемого процесса или явления, иначе возникает сопоставимая по сложности задача исследования самой модели. Очевидно, что успехи моделирования существенно зависят от способностей создателей модели понять и оценить самые главные черты и характеристики, которые следует учитывать.

- Модели экосистем, в отличие от моделей неживой природы, хотя и используют в качестве языка описания дифференциальные уравнения, они не основаны на физических законах (в части трансформации субстанций) и на уравнениях химических реакций, поскольку трансформации в моделях экосистем рассматриваются на макроуровне. Эти трансформации (практически все) весьма сложны, и многие из них не до конца изучены (В. В. Меншуткин, [7]). Основу уравнений экологических моделей составляют различные эмпирические закономерности, установленные в процессе изучения и обработки результатов наблюдений. Эти уравнения содержат в изобилии эмпирические зависимости и коэффициенты. Фундаментальной и бесспорной основой этих уравнений служат законы сохранения (изменения) массы вещества. Точное выполнение законов сохранения массы вещества в дискретных моделях является важным фактором контроля за адекватностью дискретной реализации моделей.

- Перечисленные ограничения возможностей создания и применения моделей не отрицают необходимости и важности математического моделирования экосистем как инструмента исследований.

Из всех моделей остановлюсь более подробно на модели гидротермодинамики и ее использовании для построения климатической циркуляции и оценки с ее помощью возможных изменений в гидротермодинамическом режиме Ладожского озера под влиянием изменения климата на водосборе озера вследствие глобального потепления.

Созданные модели использовались для исследования эволюции экосистем Ладожского и Онежского озер в процессе антропогенного эвтрофирования. Некоторые из этих моделей вошли в состав СППР (системы поддержки принятия решений) по интег-

рированному управлению водной системой Ладожское озеро–река Нева–Невская губа [4, 8].

Литература

1. Астраханцев Г. П., Меншуткин В. В., Петрова Н. А., Руховец Л. А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер // Под ред. Л.А. Руховца. СПб: Наука, 2003. 363 с.
2. Данилов-Данильян В. И. Устойчивое развитие (теоретико-методологический анализ) // Вестник РАН. 2007. Т. 77. № 2. С. 108–114.
3. Данилов-Данильян В. И. Водные ресурсы – стратегический фактор долгосрочного развития экономики России // Вестник РАН. 2009. Т. 79. № 9. С. 789–798.
4. Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Опыт создания системы поддержки принятия решений / Под ред. А.Ф. Алимова, Л.А. Руховца и М.М. Степанова. СПб: СПб Научный центр РАН, 2001. 420 с.
5. Леонов А. В., Осташенко М. М., Лаптева Е. Н. Математическое моделирование процессов трансформации органического вещества и соединений биогенных элементов в водной среде: предварительный анализ условий функционирования экосистемы Ладожского озера // Водные ресурсы, 1991. № 1. С. 51–72.
6. Меншуткин В. В., Воробьева О. Н. Модель экосистемы Ладожского озера. В сб. Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1987. С. 187–200.
7. Меншуткин В. В. Имитационное моделирование водных экологических систем. СПб.: Наука, 1993. 154 с.
8. Невская губа – опыт моделирования / Под ред. В.В. Меншуткина. СПб.: СПб НЦ РАН, 1994. 375 с.
9. Astrakhsantsev G. P., Rukhovets L. A. On the improvement of the approximation order for discrete model of circulation in the deep lake. Jyväskylä-St.Petersburg Seminar on Partial Differential Equations and Numerical Methods, Proc. Jyväskylä Univ. Math. Inst., 56. 1993. P. 5–24.
10. Astrakhsantsev G. P., Rukhovets L. A. A three-dimensional model of transformation of biogenes and organic matter in lakes. Russ. Journal of Numerical Analysis and Mathem. Modelling, 1994. Vol. 9. № 1–12.
11. Astrakhsantsev G. P., Poloskov V. N., Rukhovets L. A. Numerical model of the Lake Ladoga: model of the climatic circulation and ecosystem model. Proceeding of work-shop in Helsinki, May, 1998. P. 80-97.
12. Rukhovets L. A., Filatov N. N. (Eds). Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observation and Modeling. Springer-Praxis Publishing. 2010. 320 p.

РОЛЬ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ SMART GRID

К. А. Сотников, Р. И. Ивановский, А. Н. Беляев, Ю. Г. Карпов
(Санкт-Петербург)

Введение

Реализация принципов Smart Grid – это процесс внедрения современных инновационных технологий, в том числе информационных и телекоммуникационных, в электроэнергетические системы для повышения их эффективности, экономичности и надежности. Инициатива создания и внедрения Smart Grid получает все более широкое распространение во всем мире: давно назрела необходимость кардинального решения проблем, связанных с крупномасштабными авариями электросетей, огромными потерями в линиях электропередач, архаичными технологиями диспетчирования и управления энергосетями, трудностями включения в энергосистему новых потребителей и альтернативных источников энергии. В России такие системы называются “интеллектуальными энергосистемами”, “умными сетями”, “активно-адаптивными энергосистемами” и т.п. Предпосылками развития электрических сетей подобного рода являются развитие распределенной генерации, появление «гибких» элементов, новые возможности аккумулирования энергии, появление новых технологии измерений, развитие информационных технологий.

Пилотные проекты по развитию интеллектуальных сетей уже появились в США, Китае, нескольких странах Европы. В России в феврале 2010 г. премьер-министр В.В.Путин поставил перед председателем правления ОАО «ФСК ЕЭС» О.Бударгиным задачу создания новой технологической платформы всей российской единой энергосистемы на базе интеллектуальных сетей. ФСК была разработана пятилетняя программа внедрения «умных» сетей [1, 2] на период 2010–2014 гг., на реализацию первого этапа которой предусмотрены инвестиции в размере 519 млрд. рублей.

Разработка технологий Smart Grid в России – это одна из немногих технологических революций, где Россия имеет шанс идти в ногу с наиболее передовыми развитыми странами.

Внедрение инновационных технологий в электроэнергетику отличается от подобных процессов в других сферах огромным возможным выигрышем в эффективности, но и огромными материальными потерями при внедрении неверных решений, например, в управлении электроэнергетическими системами (ЭЭС). Эти отличительные черты определяются самим объектом: его масштабностью и взаимозависимостью фактически всех параметров и характеристик единой электроэнергетической системы огромной страны. На таком объекте невозможно ставить натурные эксперименты по проверке тех или иных решений: развал электроэнергетической системы при таких экспериментах приведет к коллапсу целых районов страны. Единственным выходом в решении проблем инновационного обновления управления энергосистемой является имитационное моделирование.

Постановка проблемы

Можно рассматривать реализацию Smart Grid как бесконечный процесс внедрения в электроэнергетические системы современных инновационных технологий. Этот процесс начался давно и будет продолжаться долго, полностью аналогично тому, как внедрение инновационных технологий происходит в автомобилестроении, телевидении, коммуникации, спорте и во множестве других сфер нашей жизни.

Такой взгляд на развитие Smart Grid накладывает определенные требования на внедрение инновационных технологий или устройств в энергосистему, он ограничивает выбор решений, которые принимаются при выполнении проектов построения или модернизации сети. Все внедряемые в электроэнергетические системы технологии и устройства должны быть согласованными и не противоречащими друг другу. Согласованность должна достигаться путем повсеместного использования четких стандартов на аппаратные и программные средства, как существующих, так и новых, разрабатываемых в процессе внедрения новых технологий.

Невозможно только локально, в одном доме или районе, внедрить, например, противоаварийное управление энергосистемой: такая инновация затронет все уровни энергосистемы: генерация, транспорт, распределение и потребление энергии. Указанная выше концепция развития четко определяет, что не существует финальной конфигурации Smart Grid, достижение которой поставит точку в ее развитии – в процессе внедрения технологии могут претерпевать изменение и модификации, ранее внедренные в ЭЭС средства будут устаревать и подвергаться модернизации.

Учитывая постоянную итеративную изменяемость Smart Grid, неотъемлемой характеристикой результатов внедрения новых технологий и элементов должно стать обеспечение целостности, надежности функционирования ЭЭС в целом, преемственности, что может быть достигнуто путем четкого задания следующих требований ко всем внедряемым решениям:

- ♦ *Комплексность* – каждый отдельный проект в рамках Smart Grid должен являться внедрением технологического решения «под ключ» с полным решением задач, возникающих при использовании новой технологии.

- ♦ *Развиваемость* – каждый отдельный проект в рамках Smart Grid должен учитывать возможные перспективы развития соответствующих технологий.

- ♦ *Масштабируемость* – каждый проект должен обеспечивать возможность тиражирования, расширения, использования в широком спектре подобных и смежных систем, а также использования результатов проекта в других решениях.

- ♦ *Согласованность* – каждый проект должен быть максимально согласован с существующими решениями, четко следовать спецификациям и стандартам в соответствующей сфере.

- ♦ *Системность* – каждый проект должен учитывать и анализировать влияние его внедрения на всех уровнях функционирования ЭЭС: уровнях генерирования, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

Из представленной выше концепции можно сделать вывод о том, что к традиционным характеристикам сложности задач, решаемых в области электроэнергетических систем, таким как размерность и многосвязность, фактическая невозможность проведения натурных экспериментов, Smart Grid системы добавляют новые уровни трудности реализации, среди них:

- необходимость комплексного, системного подхода к реализации задач любого уровня сложности;

- необходимость планирования и учета влияния каждого разрабатываемого решения, каждой проводимой работы на всех уровнях функционирования энергосистем;

- необходимость всестороннего учета существующих и разрабатываемых решений и связей с ними;

- полное соответствие стандартам и нормативным документам;

- необходимость соответствия требованиям комплексности, развиваемости, масштабируемости, согласованности, системности.

Органичным способом решения обозначенных проблем является использование имитационного моделирования на этапе проектирования и разработки приложений Smart Grid. Использование моделей позволяет заменить натурные эксперименты в электроэнергетических системах компьютерными исследованиями, снизить уровень неопределенности объектов, отработать комплексные связи и зависимости, проверить решения на соответствие требованиям и стандартам.

Имитационное моделирование в разработке приложений Smart Grid

Для решения задач разработки приложений Smart Grid в Санкт-Петербургском политехническом университете была создана открытая расширяемая библиотека стандартных элементов электроэнергетических систем, включающая в себя подробные модели синхронных/асинхронных генераторов, двигателей на основе дифференциальных уравнений статорных и роторных контуров и электромеханических переходных процессов; модели линий электропередач, статических нагрузок, шунтирующих реакторов; статических тиристорных компенсаторов, шунтов коротких замыканий, автоматических регуляторов возбуждения (АРВ-СД) синхронных генераторов, автоматических регуляторов частоты и активной мощности (АРЧМ); системной автоматики и т.д. Дополнительно библиотека содержит средства моделирования аварийных ситуаций различного вида и уровня, ввода/вывода потребителей и источников энергии, интерфейсы подключения «умных» устройств, а также средства визуализации моделей и управления функционированием моделей в процессе выполнения (в режиме реального времени). Все эти модели элементов ЭЭС представлены графическими образами, поэтому создание модели сложной системы состоит из построения структуры модели методом “dgar-and-drop”, и последующей настройки параметров элементов. С использованием библиотеки элементов были разработаны тестовые модели для проведения базовых исследований и экспериментов.

В процессе разработки библиотеки стандартных элементов решались следующие комплексы проблем:

- ✓ Определение, выбор и анализ математических моделей элементов ЭЭС, позволяющих представлять элементы с высокой степенью точности и достоверности, а также комплексные связи между ними.
- ✓ Выбор и анализ платформ компьютерного моделирования, позволяющих создавать модели ЭЭС большой размерности и высокой степени сложности.
- ✓ Разработка универсальной открытой библиотеки компьютерных моделей типовых элементов ЭЭС различной степени детализации, позволяющей в максимально короткие сроки и минимальными трудовыми затратами осуществлять реконфигурацию элементов, уточнение и корректировку их математического описания, ввод моделей новых современных элементов.
- ✓ Разработка пользовательских интерфейсов, средств сбора, обработки и представления данных.
- ✓ Разработка типовых моделей реально действующих региональных энергосистем.
- ✓ Проверка достоверности, калибровка разработанных элементов и моделей.

Разработанная архитектура библиотеки и ее элементов позволяет учитывать специфику конкретных прикладных задач на единой платформе, в рамках единой базы данных, а также анализировать процессы в конкретной системе с учетом ее реальных параметров и характеристик и проводить параметризованный анализ возможных сценариев изменения, развития, изменения параметров.

Применительно к задачам разработки приложений Smart Grid имитационные модели электроэнергетических систем целесообразно использовать в качестве виртуальных объектов, способных предоставлять необходимые данные о специфических особенностях рассматриваемых систем в динамике (быстрые, медленные, переходные процессы, взаимное влияние технологий) и статике, а также проверять соответствие поведения отдельных элементов стандартам и нормативным актам. Далее в рамках настоящей публикации приведено описание двух проектов, разрабатываемых с непосредственным использованием имитационных моделей как виртуальных объектов.

Проект: внедрение интеллектуального управления в электроэнергетические системы (ЭЭС)

Одним из проектов по разработке технологий Smart Grid в СПбГПУ является работа по внедрению интеллектуального управления в ЭЭС, проводимая в сотрудничестве двух кафедр различных факультетов: кафедры «Распределенные вычисления и компьютерные сети» и кафедры «Электрические системы и сети».

Цель проводимых – применение современных средств, теории и технологий моделирования, визуализации, компьютерной математики и численных методов к решению интегральных задач интеллектуального управления ЭЭС в рамках концепции Smart Grid. Эти технологии заключаются в использовании существующих и в разработке новых методов, алгоритмов и средств регулирования и противоаварийного управления в ЭЭС на основе исследований, проводимых коллективом разработчиков в течение последних 10 лет [3–7].

Используя имитационные модели (ИМ) ЭЭС в качестве виртуальных объектов, исследователь может проводить модельные эксперименты во всех режимах работы ЭЭС, без каких-либо ограничений на последствия таких экспериментов для исследуемой ЭЭС [1, 2]. Подобная свобода проведения компьютерных экспериментов обеспечивает уникальные возможности для снятия неопределенностей динамических свойств ЭЭС как объекта управления, что трудно переоценить применительно к решению широкого класса прикладных задач управления ЭЭС. Построенная библиотека имитационных моделей позволила нам решить широкий спектр задач, связанных с управлением устойчивостью ЭЭС в нормальных и аварийных режимах, а также восстановлением и самовосстановлением ЭЭС после системных аварий.

Причиной критических нарушений устойчивости в ЭЭС могут выступать как недопустимые колебания нагрузки в условиях дефицита генерируемой мощности, так и отключения (частичные или полные) линий электропередачи, например, в результате короткого замыкания. В качестве иллюстрации можно привести некоторые пути построения управлений с использованием имитационных моделей (ИМ).

Динамические характеристики операторов в основных каналах и в перекрестных связях многомерного объекта управления могут быть выявлены на ИМ ЭЭС путем реализации серии компьютерных экспериментов. В каждом эксперименте серии осуществляется возмущение i -го узла и анализируются реакции всех n узлов. Таким путем формируется $(n \times n)$ -матрица динамики анализируемой ЭЭС, i -й столбец которой содержит реакции n узлов на возмущение в i -м узле. Существенно при этом отметить, что подобные компьютерные эксперименты должны учитывать тип задачи синтеза, которую предполагается решить, –полного или частичного синтеза. При полном синтезе моделируемый объект должен быть «очищен» от регуляторов в элементах, его составляющих. При частичном синтезе часть таких регуляторов или все регуляторы могут быть сохранены. Применительно к элементам ЭЭС целесообразно рассматривать задачи частичного синтеза, поскольку использование традиционных регуляторов (скорости вращения вала турбины, регуляторов возбуждения генераторов) является естественным.

Понятно, что задачи частичного синтеза связаны с коррекцией свойств существующих систем управления. Полученные в таких задачах регуляторы могут быть названы регуляторами-корректорами.

Анализ свойств многомерного объекта применительно к задаче частичного синтеза был проведен на основе разработанной библиотеки моделей типовых элементов ЭЭС. В процессе моделирования изменялась нагрузка на каждом из узлов, фиксировались реакции (изменения частоты и мощности) на эти возмущения. Типовая реакция (отклонение скольжения) одного из узлов ЭЭС на скачкообразное приращение нагрузки представлена на рис. 1.

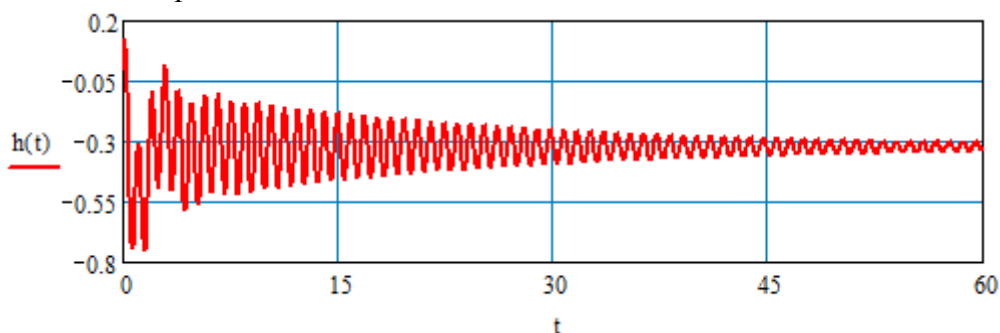


Рис. 1. Типовая реакция регулируемого узла на изменение нагрузки

Как следует из рис. 1, реакция представляет сложный колебательный процесс с амплитудой, медленно меняющейся по экспоненте. Затухание процесса происходит примерно за 60 с. Аппроксимация полученных в результате моделирования реакций звеньев многомерного объекта в основных каналах и перекрестных связях показывает, что процессы такого типа (см. рис.1) достаточно точно представляются переходными характеристиками суммы двух динамических звеньев второго порядка. Для приведенной на рис. 2 реакции подобная аппроксимация дает передаточную функцию вида

$$H(p) = \frac{-0.767p - 1.3}{p^2 + 1.028p + 3.475} + \frac{1.88p}{p^2 + 0.09p + 45.9} . \quad (1)$$

Синтез управляющей части многомерной системы с объектом, передаточная матрица которого имеет элементы вида (1), представляет нетривиальную задачу. Такой синтез может быть осуществлен на основе подхода, изложенного в работе [8], основу которого составляет задание требуемой динамики замкнутой системы. Этот подход предполагает выполнение ряда последовательных этапов, среди которых:

- анализ свойств объекта управления, имеющего передаточную матрицу $H(p)$;
- задание требуемых динамических свойств замкнутой системы в форме передаточной матрицы $F(p)$;
- получение передаточной матрицы $R(p)$ управляющей части;
- упрощение структуры и/или элементов матрицы $R(p)$;
- анализ качества полученной системы при выбранном варианте $R(p)$.

Опуская детали синтеза, рассмотренные в [8], отметим обстоятельства, связанные с реализацией многомерного регулятора $R(p)$ в структуре ЭЭС. Следует признать, что точная реализация структуры многомерного регулятора потребует организации $(n - 1)n$ перекрестных связей между узлами ЭЭС. Подобное усложнение структуры для ЭЭС с большим числом генерирующих узлов является бесперспективным. В то же время упрощение структуры, полученной в результате синтеза передаточной матрицы $R(p)$, не гарантирует выполнения требований к замкнутой системе. Отсюда следует вывод о единственно приемлемом подходе, который связан с частичным (коррекционным) синтезом выбранного числа узлов ЭЭС. При этом синтез многомерного регулято-

ра распадается на k ($k < n$) задач одномерного синтеза, для каждой из которых может быть применен тот же подход, опирающийся на предварительное задание требуемых свойств замкнутой системы.

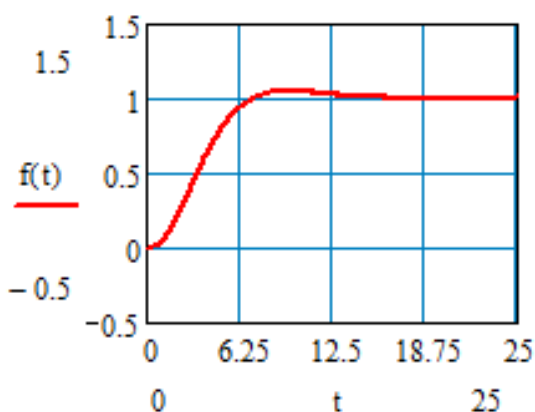
Рассмотрим синтез корректора применительно к звену с передаточной функцией (1), переходная характеристика которого приведена на рис. 1. Отдельные этапы синтеза будем сопровождать копией фрагментов, полученных в среде Mathcad, интеграция ИМ с которой была осуществлена в процессе работы над проектом для осуществления символьных вычислений.

Для обеспечения астатизма процесса выработки частоты потребуем от замкнутой системы реакции $f(t)$ на единичное воздействие (в относительных единицах), изображенной на рис. 2, а. Требуемый для этого корректор, в силу подхода, описанного в [8], будет иметь передаточную функцию вида

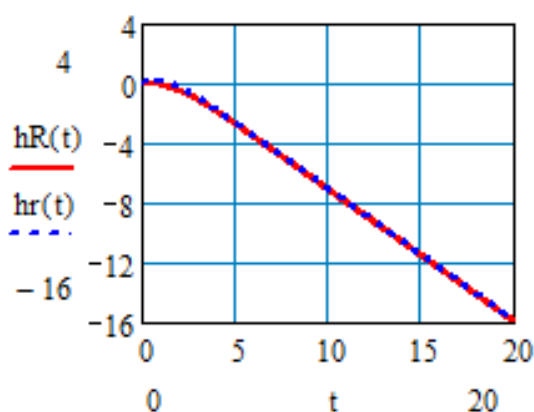
$$\left. \begin{array}{l} \text{convert, parfrac, p} \\ \text{float, 3} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{-0.884}{p} - \frac{1.18}{p + 4.19} + \frac{14.2}{p + 2.01} - \frac{19.6}{p + 1.64} + \frac{7.41}{p + 1.06} \quad (2)$$

Переходная характеристика $hR(t)$ такого корректора приведена на рис. 2, б (сплошная линия). Эта характеристика может быть успешно аппроксимирована. В качестве одного из приемлемых вариантов аппроксимации можно выбрать звено с передаточной функцией

$$\left. \begin{array}{l} \text{r float, 3} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{-0.884}{p} + \frac{1.82}{1.2 \cdot p + 1} \quad (3)$$



а)

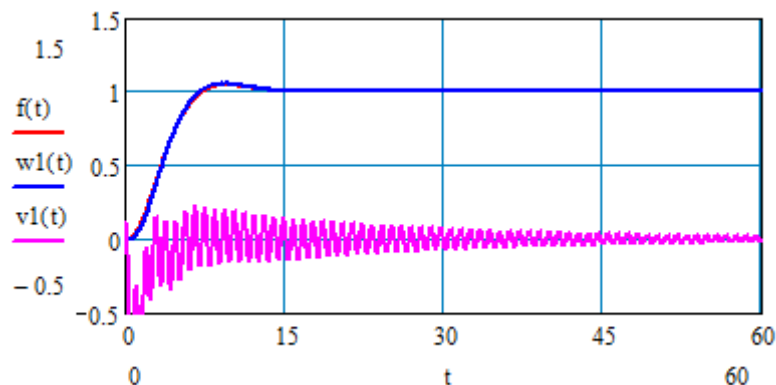
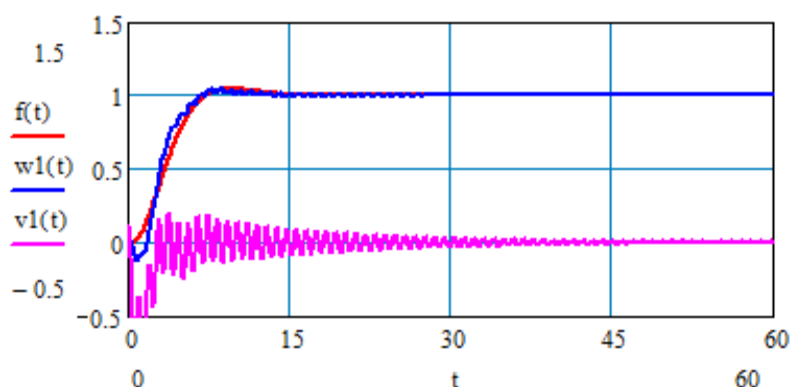


б)

Рис. 2. Характеристика системы (слева) и корректора

Переходная характеристика $hr(t)$ аппроксимированного корректора изображена на рис. 2, б пунктиром.

Результатирующее качество системы замкнутой системы регулирования частоты с корректорами полной $R(p)$ и упрощенной структуры $r(p)$ иллюстрируется рис. 3 и 4 соответственно. На графиках указанных рисунков обозначены: $f(t)$ – заданная переходная характеристика замкнутой системы; $wI(t)$ – переходной процесс отработки единичного задающего воздействия (уставка); $vI(t)$ – переходной процесс отработки единичного воздействия на объект (100%-й набор нагрузки).

Рис. 3. Переходные характеристики системы с корректором $R(p)$ Рис. 4. Переходные характеристики системы с корректором $r(p)$

Сопоставительный анализ приведенных графиков иллюстрирует эффективность введения корректора в традиционную систему регулирования числа оборотов турбины. Полученные на основе описанного подхода варианты корректора обеспечивают простоту технической реализации и возможность варьирования параметров корректора в широких пределах.

Описанный подход в рамках работы над проектом был использован и для других постановок, например для синтеза системы регулирования при требованиях к реакциям системы на изменение нагрузки турбогенератора, что существенно для обеспечения высокого качества электроэнергии при суточном изменении графика нагрузок. Кроме того, для некоторых подзадач представленный подход использовался для решения проблемы построения математических и имитационных моделей элементов энергетических объектов по результатам их натурных испытаний.

В числе других проблем, решенных в рамках реализации проекта на примере реально действующих ЭЭС, были решены следующие задачи:

- создание математических моделей сложных гибридных систем электроэнергетики;
- разработка адекватных методов прогнозного моделирования;
- разработка алгоритмов управления устойчивостью;
- оптимизация уровней напряжения и потоков реактивной мощности;
- оценивание опасности «лавины напряжения»;
- выявление локальных аварийных ситуаций и самовосстановление;
- выявление колебаний и демпфирование;
- оптимизация потоков активной мощности;

- адаптация устройств релейной защиты;
- разработка алгоритмов динамической реконфигурации ЭЭС;
- разработка комплекса мероприятий по повышению устойчивости ЭЭС;
- разработка алгоритмов управления распределенными источниками и накопителями энергии;
- создание интеллектуальных тренажеров для оперативного персонала с применением имитационных моделей.

В рамках проекта были решены также многие задачи, решение которых было бы чрезвычайно осложнено без использования имитационных моделей:

- разработка систем глобального, локального регулирования и ситуационного управления;
- решение многокритериальных задач выбора местоположения и синтеза системных регуляторов, включающих в себя разработку дополнительной экспериментальной среды;
- выработки методики синтеза многомерных корректирующих устройств
- определение адекватных реакций на аварийные ситуации в целях обеспечения живучести и устойчивости системы;
- определение адекватных реакций на колебания режима нормального функционирования системы;
- выявление допустимых запаздываний в реагировании на поступившие возмущения;
- анализ вопросов «быстрого» включения и переключения элементов современных ЭЭС (балансирующие устройства, новые типы технологического оборудования).

Разработанная система имитационного моделирования динамики элементов и комплексов электроэнергетических систем позволяет учесть специфику конкретных прикладных задач на единой платформе, в рамках единой базы данных с применением средств визуализации и привязки к местности объектов ЭЭС на основе электронных карт и географических информационных систем (ГИС).

Проект: оценка и управление качеством предоставляемого сервиса в Smart Grid

Данный проект направлен на разработку качественно нового подхода к оценке качества предоставляемого сервиса в ЭЭС и управления им. Использование имитационного моделирования, а конкретно так называемых «композиционных» моделей, интегрирующих в рамках единого решения различной природы, позволяет использовать применительно к ЭЭС нового поколения модифицированные алгоритмы управления качеством сервиса, широко применяемые в области управления IT-решениями, в частности при анализе и управлении качеством предоставляемого сервиса в компьютерных сетях.

В процессе работы над проектом ведется разработка методик и алгоритмов оценки и управления качеством сервиса в Smart Grid (Quality of Service, QoS) путём использования многокритериальных целевых функций, позволяющих интегрировать множество параметров энергоснабжения с учётом различных типов и категорий потребителей. Данная методика использует методики Service Level Agreements (SLA), Service Level Objectives (SLO), Balanced Scorecards (BS), алгоритмы многокритериального выбора и принятия решений на основе прогнозного моделирования. Так, использование SLA дает возможность обеспечить возможность учета универсальных метрик, позволяющих интегрировать в единую целевую функцию параметры и характеристики различной природы (например, критерии качества и параметры энергоснабжения, ценооб-

разование и взаиморасчеты, уровни потребления и генерации и пр.). Такая работа может быть выполнена только на основе имитационных моделей, использования стратегий “what-if” и встроенных в платформу имитационного моделирования методов оптимизации [8].

Внедрение представленных алгоритмов и методик, опирающихся на средства «композиционного» имитационного моделирования, позволяет решить проблемы:

- повышения эффективности ЭЭС;
- выбора и ранжирования вариантов модернизации ЭЭС в условиях ограниченных инвестиций;
- систематизации и упорядочивания взаимодействия участников энергетического рынка на всех уровнях;
- создания необходимых метрик качества энергоснабжения для участников электроэнергетического рынка в новых условиях;
- объективной оценки качества фрагментов Smart Grid на основе единых критериев;
- дополнения ЭЭС такими ключевыми характеристиками как безопасность (обеспечение устойчивости, качество регулирования и управления), эффективность (управление генерацией и нагрузкой, распределение потоков мощности и пр.) и выгода за счет появления структурированного и прозрачного договорного механизма, учитывающего весь спектр показателей качественного энергоснабжения.

Предлагаемый подход, основанный на сочетании метрик и алгоритмов оценки качества предоставляемого сервиса и «композиционного» имитационного моделирования позволяет получить качественно новое, интегрированное решение актуальных проблем оценки и управления качеством сервиса в сфере современной электроэнергетики.

Заключение

Использование имитационного моделирования позволяет получить решение ключевых задач разработки и внедрения Smart Grid, связанных именно с проблемами “интеллектуального управления” ЭЭС. Безусловно, круг тех задач, которые могут быть решены в данной области с использованием имитационного моделирования, не ограничивается представленными в данной публикации. Имитационные модели могут и должны быть применены, в частности, в задачах планирования внедрения элементов, координации технологий на физическом и информационном уровне, проверки решений с точки зрения безопасности и устойчивости, тестирования интерфейсов взаимодействия и моделей информации и пр. Мы считаем, что внедрение технологий Smart Grid должно происходить в условиях тесного взаимодействия специалистов в области энергетики и информационных технологий с широким использованием имитационных моделей на разных уровнях планирования, разработки и внедрения.

Литература

1. ФСК ЕЭС: новый вектор развития сетей // Энергоинфо. 2010. №11 (46).
2. **Бударгин О. М.** Умная сеть – платформа развития инновационной экономики // Корпоративный сайт ОАО «ФСК ЕЭС». 2010 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Microsoft PowerPoint. – URL: http://www.fsk-ees.ru/media/File/press_centre/speeches/Presentation_budargin.pdf (дата обращения: 10.09.2011).
3. **Беляев А. Н., Смолвик С. В.** Программирование на примере электротехнических и электроэнергетических задач: Учебное пособие. СПб: СПбГТУ, 2000. 74 с.

4. **Karpov Y., Ivanovski R., Popov D., Voropai N.** Hierarchical Modeling of Electric Power System Expansion by AnyLogic Simulation Software // IEEE Conf on Electric Power Systems. St.Petersburg, 2005.
5. **Ивановский Р. И., Савков В. К.** Имитационное моделирование энергосистем. Проблемы и возможности // Электросистемы. 2005. № 2–3. С. 18–20.
6. **Ивановский Р. И., Нестеров А. В.** Синтез многомерных систем управления. Проблема устойчивости // Тр. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2005). СПб: СПбГЭТУ. 2005. Т. 2. С. 62–66.
7. **Ивановский Р. И., Нестеров А. В., Сотников К. А.** Противоаварийное управление в электрических сетях на основе имитационных моделей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб: СПбГПУ. 2008. № 2.
8. **Карпов Ю. Г.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 435 с.

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТРАДИЦИИ В ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ю. И. Толуев (Магдебург), Д. А. Иванов (Гамбург)

Введение

Развитие имитационного моделирования в российской и зарубежной теории и практике имеет много как общих, так и различных тенденций. Начиная с 2003 года, в Санкт-Петербурге проводится Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию (ИММОД), которая является почти единственной на территории стран СНГ конференцией, на которой обсуждаются вопросы «неспециального» имитационного моделирования (ИМ). Другой, сравнимой с ИММОД конференцией является лишь научно-практическая конференция с международным участием «Математическое и имитационное моделирование систем» (МОДС), которая начиная с 2006 года ежегодно проводится Национальной академией наук Украины.

Так как на каждой конференции ИММОД бывает представлено более сотни докладов, в совокупности они достаточно полно отражают состояние дел в области ИМ в России и труды ИММОД можно рассматривать как некое «зеркало» положения дел в российском ИМ. Подробный и вполне объективный анализ этого состояния сделал Андрей Борщёв в своём докладе на ИММОД-2007 [1], где он, в частности, с сожалением отмечал, что российские специалисты практически не участвуют в самых известных конференциях по ИМ, проводимых за рубежом. Два года спустя на ИММОД-2009 был представлен доклад Юрия Меркурьева [2], в котором автор описывает работу Международного общества имитационного моделирования (The Society for Modeling and Simulation International – SCS) и Европейской федерации обществ имитационного моделирования (Federation of European Simulation Societies – EUROSIM), а также даёт характеристику 15 наиболее известным международным конференциям, из которых девять полностью посвящены вопросам ИМ.

Одним из признаков «особого пути» развития ИМ в России является также «перевернутая пропорция», отражающая относительные доли теоретических и прикладных работ в области ИМ. На Западе на одну теоретическую разработку (диссертацию или просто статью, которая касается методологии или математических аспектов ИМ) приходится приблизительно пять «настоящих проектов», которые были выполнены по заказам предприятий и соответствующим образом оплачены. В России же большинство публикуемых работ по ИМ являются «теоретическими» разработками, причём слово «теоретическими» приходится брать в кавычки, так как далеко не все из этих разработок содержат в себе истинные теоретические результаты, способные положительно повлиять на скорость или качество выполнения работ по практическому моделированию. Часто работу приходится относить к области «теории» только потому, что её автор лишь рассуждает на тему «какой должна быть модель», но даже не делает попытки реализовать эту модель в виде компьютерной программы, которая является единственной формой существования любой законченной имитационной модели и единственным средством проверки любых новых идей в области ИМ.

Конечно, к ИМ можно и нужно продолжать относиться как к «искусству и науке» (эти слова взяты из названия очень популярной книги Роберта Шеннона: Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978), так как эти виды творчества необходимо проявлять при построении любой нетривиальной имитационной модели. Но нельзя игнорировать и тот факт, что существует так называемый «ремесленнический» взгляд на ИМ, который основывается на утверждении о том, что с помощью хороших инструментов типовые модели можно «печь как блины». Истина,

как всегда, находится где-то посередине, так как именно в области моделирования производственных и логистических систем определённая «стандартизация» процессов разработки и использования моделей является вполне возможной и целесообразной. Наилучшим образом этот тезис подтверждается опытом создания и применения в Германии так называемых рекомендаций VDI, прямо относящихся к имитационному моделированию объектов данной категории.

В данной статье опыт создания и применения рекомендаций VDI описывается как пример формирования устойчивых инженерных традиций в области ИМ, соблюдая которые сотни специалистов регулярно занимаются разработкой моделей, используемых при решении задач проектирования и реконструкции производственных и логистических систем. В качестве второй традиции описывается всемирно распространённая практика работы с главным хранилищем публикаций по ИМ – трудами Зимней конференции по имитационному моделированию WSC [2].

Основы инженерного подхода к моделированию производственных и логистических систем

В области ИМ производственных и логистических систем «классическими» можно считать обе парадигмы моделирования: дискретно-событийное моделирование и моделирование методом системной динамики [3]. Примерно в одно и то же время, т.е. в начале 60-х годов прошлого столетия, оба метода перестали быть предметом интереса только математиков и программистов, так как в виде соответствующих инструментов для построения компьютерных моделей они были переданы в руки инженеров и экономистов. В области дискретно-событийного моделирования таким инструментом стал язык GPSS, а в области системно-динамического моделирования – язык Dynamo. Аналогия между этими парадигмами заключается в том, что оба вида моделей можно называть «потокowymi», так как суть процесса моделирования заключается в продвижении некоторого субстрата (материалов, изделий, транспортных средств, пассажиров, информационных сообщений, денежных средств и пр.) через сетевую структуру, состоящую из узлов, в которых субстрат может накапливаться (задерживаться для целей хранения, транспортировки или обработки), и связей между узлами, в которых образуются потоки субстрата, перемещающегося от одного узла к другому. Принципиальное различие между дискретно-событийными и системно-динамическими моделями заключается в способе представления в них потоков субстрата: в первом случае их рассматривают как последовательности дискретных объектов, аналогичных заявкам в системах массового обслуживания, а во втором – как непрерывные потоки, в которых учитывается лишь количество перемещаемого субстрата и отсутствует возможность отображения движения отдельных дискретных объектов. Системно-динамическая модель может быть представлена как гидравлическая система, которая состоит из сосудов и соединяющих их трубок, каждая из которых снабжена управляемым «вентилем», обеспечивающим требуемую на данный момент времени интенсивность потока.

В течение почти 50 лет складывалась совершенно различная практика применения дискретно-событийного [4, 5] и системно-динамического [6] подходов в моделировании.

Именно дискретно-событийные модели, как средство прямого отображения процессов в производственных и логистических системах, чаще всего являются результатом труда инженеров, а количество создаваемых моделей этого класса является весьма большим: только в одной Германии создаётся несколько сотен моделей в год, а в мире – несколько тысяч. Процесс построения моделей этого класса хорошо проработан методически (см. описываемые ниже рекомендации VDI) и для его автоматизации созданы эффективные пакеты имитационного моделирования (ПИМ), среди которых наи-

более распространёнными являются AnyLogic, Arena, AutoMod, Delmia Quest, Enterprise Dynamics, ExtendSim, Flexsim, Plant Simulation, ProModel, Simul8 и Witness. Хотя разработка «серьёзных» дискретно-событийных моделей чаще всего связана с большими затратами времени и денег [5] и, кроме того, в некоторых случаях вместо них могут быть применены более «дешёвые» системно-динамические модели, решение в пользу дискретно-событийных моделей принимается уже потому, что все перечисленные выше ПИМ эффективно поддерживают разработчика модели, у которого доминирующим является не математический, а инженерный стиль мышления. Многие элементы такой модели отображают действительность почти «один к одному», т.е. при их создании не требуется прибегать к сложному абстрагированию. В итоге дискретно-событийное моделирование применяется для решения любых задач анализа и синтеза производственных и логистических систем, в которых имеется возможность получать требуемые результаты моделирования путём наблюдения за «виртуальными копиями» реальных объектов (как средств, так и предметов труда) с последующей обработкой потоков событий, получаемых в ходе такого наблюдения.

Каждая модель системной динамики есть, прежде всего, совокупность абстрактных переменных, аналогов к которым не существует в реальной действительности. Эти переменные просто «придумываются» разработчиком модели на основании его знаний об объекте моделирования и с ориентацией на выбранный уровень детализации отображения объекта в модели. Наиболее известными ПИМ, с помощью которых поддерживается разработка моделей системной динамики, являются AnyLogic, Dynamo, iThink/Stella, PowerSim и Vensim. Хотя большинство из этих ПИМ являются относительно недорогими продуктами, модели системной динамики лишь очень редко используются для анализа процессов в производственных и логистических системах. С одной стороны, это связано с низким уровнем детализации отображаемых в модели процессов, явно не достаточным для решения многих практических задач, а с другой – со сравнительно малым числом специалистов, имеющих склонность к абстрактному математическому мышлению.

Таким образом, преимущественно инженерный подход используется при построении таких моделей производственных и логистических систем, для которых характерными являются три признака:

- объектом моделирования являются процессы обработки потоков грузов и товаров в системе внутренней или внешней логистики производственного или логистического предприятия или в системе транспортной (территориальной) логистики [5];
- непосредственной целью моделирования является получение оценок статических и динамических показателей функционирования исследуемой системы, в то время как общей целью применения ИМ является, как правило, поддержка работ по проектированию или совершенствованию этой системы;
- методом моделирования является преимущественно дискретно-событийный подход, а исполняемая модель реализована с помощью одного из коммерческих ПИМ, из которых наиболее известные (а значит, многократно проверенные на практике) перечислены выше.

При использовании коммерческих ПИМ значительно упрощается процесс верификации модели, так как при этом практически исключается появление ошибок в таких стандартных процедурах моделирующей программы, как генерирование случайных чисел, планирование и обработка событий или статистическая обработка результатов моделирования. Кроме того, появляется возможность продемонстрировать модель другим специалистам, умеющим работать с данным ПИМ, что обычно и делается в ситуациях, когда необходимо провести дополнительную «независимую» проверку модели или просто получить консультацию со стороны более опытного коллеги.

Рекомендации Союза немецких инженеров

Союз немецких инженеров VDI (Verein Deutscher Ingenieure) существует с 1856 года и объединяет сегодня в своих рядах около 135 тысяч специалистов, представляющих все области науки, техники, производства и логистики. VDI является общественной организацией, но публикуемые ею документы – так называемые рекомендации VDI – де-факто являются «стандартами второго уровня» в отличие от официальных государственных и международных стандартов типа ГОСТ, DIN или ISO. Действующими считаются сегодня более чем 1700 рекомендаций, но за годы своей работы VDI остановил действие ещё около 750 опубликованных ранее документов. К разработке рекомендаций VDI привлекаются на чисто общественных началах самые авторитетные специалисты, объединяемые для этого в рабочие группы.

Значение метода ИМ для анализа реальных процессов в промышленности было в полной мере осознано в VDI уже около 30 лет назад. В 1983 году впервые появилась действующая и по сей день рекомендация под номером 3633, содержащая бюллетень № 1 с названием «Применение техники ИМ для планирования материальных потоков». В 1993 году этот бюллетень был заменён на новый с названием «Имитационное моделирование логистических систем, систем обработки материальных потоков и производственных систем; основные положения». На сегодняшний день в состав рекомендации 3633 входят 12 бюллетеней [7], содержание которых представлено в табл. 1.

Определения главных понятий ИМ, приведённые в бюллетене № 1, цитируются, как правило, во всех учебниках по ИМ в Германии. Студенты обязательно знакомятся с рекомендацией 3633 при выполнении курсовых и дипломных работ, связанных с разработкой моделей производственных и логистических систем. При выполнении промышленных проектов обе стороны, т.е. как заказчик работ по ИМ, так и исполнитель, как правило, хорошо знакомы с рекомендацией 3633. Это даёт им возможность «говорить на одном языке» на всех этапах выполнения проекта и уже в самом его начале формулировать реалистические требования к содержанию его результатов.

В 1981 году в Германии было создано общество ИМ с названием ASIM (Arbeitsgemeinschaft Simulation), объединяющее сегодня около 600 специалистов, работа которых связана с созданием или применением имитационных моделей. Одна из постоянно действующих рабочих групп ASIM имеет название «Имитационное моделирование в производстве и логистике». В последние годы члены этой группы стали авторами книг с такими названиями как «ИМ в автомобилестроении» (2003 г.), «Верификация и валидация моделей для производства и логистики» (2008 г.), «Критерии качества моделей для производства и логистики, планирование и выполнение имитационных проектов» (2008 г.) и «Имитация и оптимизация в производстве и логистике» (2011 г.). Естественно, что активисты ASIM участвуют в разработке и совершенствовании рекомендации VDI 3633.

Рабочая группа ASIM «Имитационное моделирование в производстве и логистике» раз в два года проводит конференции с одноименным названием. Осенью 2010 года на такой конференции было представлено 62 доклада, при этом моделированию производства было посвящено 25 докладов, моделированию «чисто логистических» систем – 10 докладов, а вопросам теории и новым средствам моделирования – лишь 7 докладов.

В Германии существует несколько десятков групп, которые регулярно выполняют индустриальные проекты по ИМ. Примерно половина из них являются структурными подразделениями машиностроительных и автомобилестроительных концернов. Другие же входят в состав проектных и консалтинговых организаций, работающих в области производства и логистики. Самой известной в Германии организацией такого

рода является фирма SimPlan, силами которой были успешно выполнены сотни проектов с использованием ИМ.

Таблица 1

Состав рекомендации VDI 3633 «Имитационное моделирование логистических систем, систем обработки материальных потоков и производственных систем»

№ бюллетеня	Объём	Название	Содержание
1	26 с.	Основные положения	Определение основных понятий ИМ; цели и условия применения ИМ на предприятии; средства ИМ; оценка отношения «стоимость/эффективность» при выполнении имитационных проектов
2	9 с.	Техническое задание и требования к имитационному проекту	Рекомендации для заказчика работ по ИМ, относящиеся ко всем этапам имитационного проекта: к его подготовке, выполнению и анализу результатов
3	19 с.	Планирование и анализ экспериментов	Ориентированное на цели исследования планирование имитационных экспериментов; статистическая обработка и графическое представление результатов экспериментов; интерпретация результатов
4	11 с.	Выбор средств ИМ	Способы учёта характера планируемых работ по ИМ при выборе программных средств ИМ
5	14 с.	Интеграция ИМ в процессы на предприятии	Виды моделируемых процессов на предприятии; программно-технические и организационные аспекты интеграции моделей
6	22 с.	Отображение персонала в имитационных моделях	Требования к моделям, в которых отображается работа персонала; специфика исходных данных и результатов моделирования
7	19 с.	Учёт затрат с помощью моделей	Определение точек возникновения затрат и реализация схем расчёта затрат при разработке моделей; проведение имитационных экспериментов
8	91 с.	Применение имитации в жизненном цикле оборудования	Указания по применению различных методов ИМ, начиная от трёхмерных кинематических моделей и заканчивая комплексными моделями производственных процессов
9		ИМ и электронные таблицы	(В процессе разработки)
10		Моделирование и имитация бизнес-процессов	(В процессе разработки)
11	34 с.	ИМ и визуализация	Указания по применению различных методов визуализации для отображения как исходных данных, так и результатов ИМ
12		Имитация и оптимизация	(В процессе разработки)

Труды Зимней конференции по имитационному моделированию

Ежегодно проводимая в США Зимняя конференция по имитационному моделированию WSC (Winter Simulation Conference) получила такое название в 1971 году. Фактически, эта конференция проводится начиная с 1967 года, когда она имела назва-

ние The Conference on Applications of Simulation Using the General Purpose Simulation System (GPSS). Уже в первой конференции в 1967 году приняли участие 401 человек, а в отдельные годы число участников превышало полторы тысячи. Хотя в докладах WSC обсуждается применение не только дискретно-событийного, но, например, и агентного моделирования, ориентация именно на первую парадигму остаётся отличительным признаком большинства представляемых на WSC докладов, т.е. конференция сохраняет «верность принципам GPSS» уже в течение 44 лет.

На WSC, проходившей в 2010 году, было представлено 414 докладов, причём методам и инструментам ИМ было посвящено 134 доклада, а различным сферам применения ИМ – 206 докладов. Программа каждой WSC традиционно разделена на несколько больших блоков (в скобках указано количество докладов, представленных в 2010 году):

- пленарные доклады (1 доклад);
- презентация программных средств ИМ (19 докладов);
- вводные учебные лекции по ИМ (9 докладов);
- учебные лекции для специалистов по ИМ (9 докладов);
- организация обучения ИМ (8 докладов);
- методология разработки моделей (49 докладов);
- методология анализа результатов моделирования (39 докладов);
- военные, промышленные, логистические и др. области применения ИМ (193 доклада);
- интервью с «гигантами ИМ» (2 доклада);
- аспирантский коллоквиум (36 докладов);
- стендовые доклады (36 докладов);
- примеры имитационных проектов (13 докладов).

Некоторые учебные лекции, читаемые «классиками ИМ», повторяются из года в год, иногда с небольшими изменениями. Темами таких лекций являются, в частности, следующие:

- моделирование входных воздействий системы;
- статистический анализ результатов моделирования;
- планирование имитационных экспериментов;
- принципы внутренней организации ПИМ для дискретно-событийного моделирования;
- верификация и валидация моделей;
- оптимизация моделируемых процессов;
- применение ИМ в системах поддержки принятия решений.

Только для дискретно-событийного моделирования в блоке «презентация программных средств» в 2010 году были представлены ПИМ: AnyLogic, Flexsim, SAS Simulation Studio, Arena, ExtendSim, Plant Simulation, ProModel и AutoMod.

В блоке «области применения ИМ» представлено 24 доклада, посвящённых моделированию производственных процессов, и 31 доклад, которые включены в секцию «логистика и управление цепями поставок». Под моделями производственных процессов при этом часто понимаются модели процессов внутрипроизводственной логистики: например, описана имитационная модель транспортной системы на базе робокаров и эмуляционная модель линии упаковки товаров. Доклады из секции «логистика и управление цепями поставок» отличаются большим разнообразием объектов моделирования. Здесь можно узнать, в частности, о моделях процессов на базе автомобильного, мор-

ского и авиационного транспорта, о моделях многоэтапных складских систем распределения товаров и моделях управления запасами.

Начиная с 1997 года, труды WSC в виде полных текстов докладов находятся в свободном доступе в Интернете (www.informs-sim.org/wscpapers.html). К этому хранилищу текстов по ИМ регулярно обращаются профессиональные разработчики имитационных моделей и программных средств ИМ со всего мира, а также аспиранты и преподаватели вузов, читающие курсы по ИМ. Конечно, не все представленные в этом хранилище тексты являются «абсолютными шедеврами», но вследствие их большого количества и разнообразия тематики каждый специалист всегда может найти там что-то для себя полезное или просто интересное. В целом на протяжении многих лет труды WSC чётко отображают пути развития как теоретических идей, так и практических методов ИМ. В значительной мере на базе материалов, опубликованных ранее в трудах WSC, был подготовлен «всемирно известный» справочник по ИМ [8].

Заключение

Целью написания данной статьи была демонстрация того факта, что «в мировом масштабе» имитационное моделирование производственных и логистических систем является, прежде всего, сферой деятельности инженеров, которые могут выступать как в роли заказчиков на выполнение работ по ИМ, так и в роли разработчиков моделей. Возвращаясь к трудам конференции ИММОД, следует отметить, что именно этот «средний слой», основанный на дискретно-событийном моделировании потоковых процессов в производственных и логистических системах, в иерархии моделей, традиционно обсуждаемых на ИММОД, представлен относительно слабо. Одна часть докладов имеет в своей основе «строгие математические модели», с помощью которых сравнительно адекватно могут быть описаны процессы лишь на более низком, т.е. физическом уровне, а в другой части явно просматривается стремление сразу «подняться» до стратегического моделирования бизнес-процессов, при котором результаты часто носят преимущественно качественный, а не количественный характер, т.е. отсутствуют условия для оценки точности численных результатов, обычно проводимой при выполнении инженерных работ.

Конечно, такая структура докладов на ИММОД отражает реальное положение дел в российском инженерном сообществе и «призывать» специалистов к выполнению работ по прикладному ИМ в условиях отсутствия интереса к таким работам со стороны производственных и логистических предприятий вряд ли имеет смысл. Но способствовать повышению такого интереса специалисты по ИМ всё же могут, о чём свидетельствует описанный в данной статье опыт зарубежных коллег. Давно назрела потребность в изменении самого имиджа ИМ в глазах практических специалистов, занятых на производстве и в логистике: из «страшного» математического предмета в вузе оно должно превратиться в наглядный и надёжный способ решения самых насущных задач менеджеров и проектировщиков. Примером исключительно успешного развития в России профессионального ИМ, находящегося «совсем рядом» по отношению к производству и логистике, является появление рабочих групп, занимающихся планированием транспортных потоков и организацией дорожного движения с использованием специализированных пакетов VISSIM и VISUM (www.ptv-vision.ru). В качестве «стандартной» инструментальной базы для поддержки работ по ИМ производственных и логистических систем вполне мог бы быть использован ПИМ российского производства AnyLogic, а в качестве центра координации таких работ – фирма XJ Technologies, разработавшая этот ПИМ.

Литература

1. **Борщёв А. В.** Применение имитационного моделирования в России – состояние на 2007 г. // Бизнес-информатика, 2008. № 4. С. 64-68.
2. **Меркурьев Ю. А.** Опыт международного сотрудничества в области имитационного моделирования // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сб. 4-й всероссийской научно-практической конференции. СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС. 2009. С. 57–61.
3. **Попков Т. В.** Многоподходное моделирование: практика использования // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сб. 4-й Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС. 2009. С. 62–67.
4. **Толуев Ю. И.** Применение имитационного моделирования для исследования логистических процессов // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сб. 2-й Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС. 2005. С. 71–76.
5. **Толуев Ю. И.** Имитационное моделирование логистических сетей // Логистика и управление цепями поставок. 2/25 (2008). С. 53–63.
6. **Лычкина Н. Н.** Ретроспектива и перспектива системной динамики. Анализ динамики развития // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сб. 4-й Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС. 2009. С. 48–56.
7. **Wenzel S.** VDI-Guidelines for Modelling and Simulation. In: Integration Aspects of Simulation: Equipment, Organization and Personnel. Zülch, G., Stock, P. (eds.) Karlsruhe, KIT Scientific Publishing 2010, pp. 543–550.
8. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. Banks, J. (ed.), John Wiley & Sons, 1998.

IMITATION MODELLING AND COPULA METHOD USING FOR INVESTIGATION OF ECONOMIC PROBLEMS IN TRAINING PROCESS

V. Jurenoks, V. Jansons, K. Didenko (Latvia)

Introduction

The aim of investigation is presentation of using of multivariate copula method for modeling of economic systems in practice and in training process. In real systems the parameters describing economic object not always have classical distribution. Between various random factors there is a nonlinear dependence which can't be modelled by means of linear correlation coefficient of Pearson. It causes of application of other methods of modeling. Recently the great popularity was received by modeling of joint distributions using copulas. Copula is a multidimensional function of distribution $C:[0,1]^n \rightarrow [0,1]$, which characterizes dependence between model factors. As a dependence measure between random factors can be used nonparametric correlation coefficient τ by Kendall and ρ by Spearman. These functions have been introduced to model a joint distribution once the

Statistical modelling of logistics service costs by means of nonparametric methods

In the process of simulation modelling of logistics service costs the most frequently method used to model multivariate distribution incidental values is the parametric method of modelling. In this case it is necessary to establish parameters of common distribution of incidental values characterizing the factors under consideration. Usually this is done by means of evaluation of parameters of multivariate distribution, i.e. by establishing the most suitable distribution (copula), deriving from the available empirical data. When establishing the value of the price of delivery of cargo from the point of dispatch to the point of destination P_{delivery} , such an approach will not be justified, since the amount of empirical information most frequently is insufficient for a credible assessment of parameters offered by the function of distribution. For resolving the particular problem it is necessary to use nonparametric modelling methods, given distribution of incidental values and then modelling parameters of distribution based on nonparametric values.

The value of P_{delivery} can be calculated as follows:

$$P_{\text{deliv}} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5, \quad (1)$$

where C_1 – cost of transportation of one loaded container from the port of loading to the port of discharge (unloading) (a port in the Republic of Latvia); C_2 – the value of customs duties and charges and other compulsory payments necessary for moving the cargo on the territory of the Republic of Latvia; C_3 – cost of handling cargo (loading-unloading operations) in the port; C_4 – cost of services of the logistics firm ensuring delivery of cargo from the consignor to the consignee; C_5 – cost of delivery of one loaded container from the port of discharge (unloading) to the port of destination of the cargo and transfer of this cargo to the consignee.

The copula for random values $C_1, C_2, \dots, C_5$ can be described by equation (2):

$$C(u_1, u_2, \dots, u_5) = \Phi(F_1^{-1}(x_1), F_2^{-1}(x_2), \dots, F_5^{-1}(x_5)), \quad (2)$$

where F_i – marginal distribution for random value C_i , $i=1,2,\dots,5$.

The algorithm of simulation of random n -dimensional vector $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ is:

I. Simulate a variable X with distribution function G such that the Laplace transform of G is the inverse of the generator.

II. Simulate n independent variates $V_1, \dots, V_n$.

III. Return $U = (\phi^{-1}(-\log(V_1)/X), \dots, (\phi^{-1}(-\log(V_n)/X))$.

Frank, Clayton and the Gumbel copula can be simulated using this procedure. For example for the Clayton copula simulation the algorithm is as follows:

- I. Simulate a Gamma variate $X \sim \text{Gamma}(1/\theta, 1)$.
- II. Simulate n independent standard uniform variates $V_1, \dots, V_n$.
- III. Return $U = ((1 - \log(V_1)/X)^{-1/\theta}, \dots, (1 - \log(V_n)/X)^{-1/\theta})$.

The modelling of random vector $C=(C_1, C_2, C_3)$ has been realised by using of MatLab programm:

The algorithm of simulation of random vector $C=(C_1, C_2, \dots, C_n)$ is:

MatLab kods:

```
n = 5000;
Rho = [1 -0.417 -0.522; -0.417 1 0.420; -0.522 0.42 1];
Z = mvnrnd([0 0 0], Rho, n);
U = normcdf(Z,0,1);
X = [logninv(U(:,1),4.75,1.32) logninv(U(:,2),2.53,0.55) wblinv(U(:,3),10.24,1.16)];
plot3(X(:,1),X(:,2),X(:,3),'b');
grid on; view([-50, 50]);
xlabel('Izm'); ylabel('NorIzm'); zlabel('Laiks');
```

The illustration of the process of modelling of incidental value $C=(C_1, C_2, C_3)$ presented in Fig. 1.

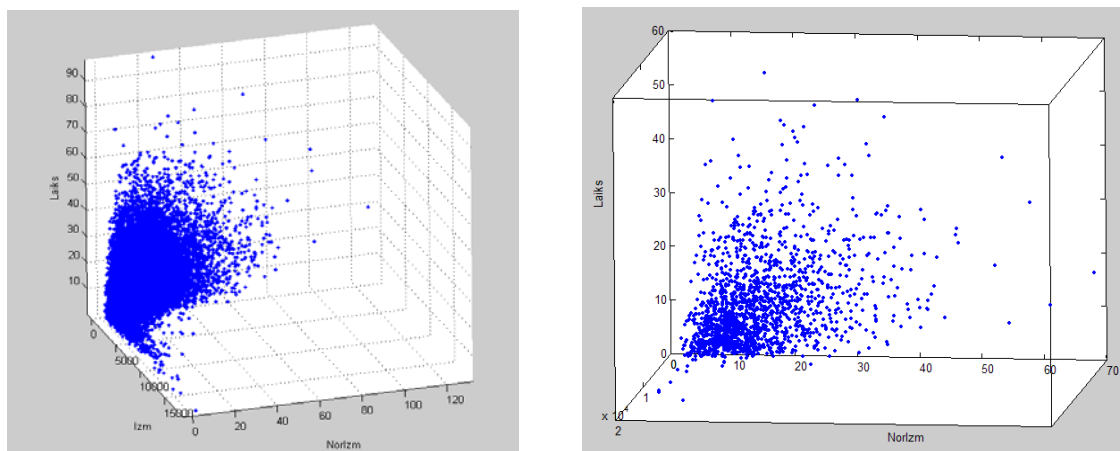


Fig. 1. Examples illustrating the process of modelling of incidental value $C=(C_1, C_2, C_3)$ with $N=5000$ and 50000 Monte-Carlo trials

By means of a histogram, marginal distributions are represented for constructing a copula, presenting a common distribution of factors. In the simplest case, distribution of each incidental value may be represented by means of a nonparametric method – a block chart. For example, Fig. 2 shows how, derived from the block charts of distribution of two incidental values – factors X_1 and X_2 , it is possible to model a bivariate common distribution considering the dependence between the factors.

The experience of modelling by using nonparametric methods demonstrates sufficiently good approximation possibilities and comparative simplicity of implementation of this method for modelling P_{delivery} . The quality of approximation has been evaluated by using of χ^2 method.

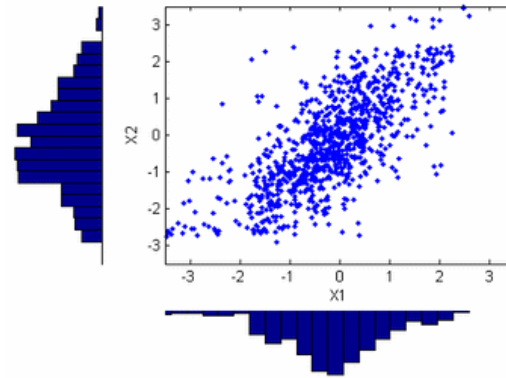


Fig. 2. Example illustrating the process of modelling of bivariate incidental value, based on nonparametric evaluation of their distribution – the histograms

Stochastic modelling of the stability of economic system

The primary goal of management of economic system (ECSYS) stability is maintaining the criterion of stability with regard to the given interval of allowable values of the chosen criterion of stability. For the evaluation of ECSYS stability it is offered to use:

- complex variable C^F of the financial stability of ECSYS;
- complex indicator C^Q of the production stability of ECSYS;
- integral indicator of the stability of the system J , which is the function of several variables and is aggregating the complex evaluation indicators C^F , C^Q of the ECSYS stability.

Criteria for estimation of ECSYS stability. The paper supposes that ECSYS is a logistics system. Modelling of the stability of functioning of a real logistics system necessitates the transfer from a continuous ECSYS functioning model to a discrete model. In a discrete model time moments are determined when the information of the condition of ECSYS stability is received. With the improvement of information supply of ECSYS performance, a real possibility arises for choosing the optimal order of control moments of time $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ of the information received about the condition of ECSYS stability. The process of modelling of ECSYS stability is presented (see Fig. 3).

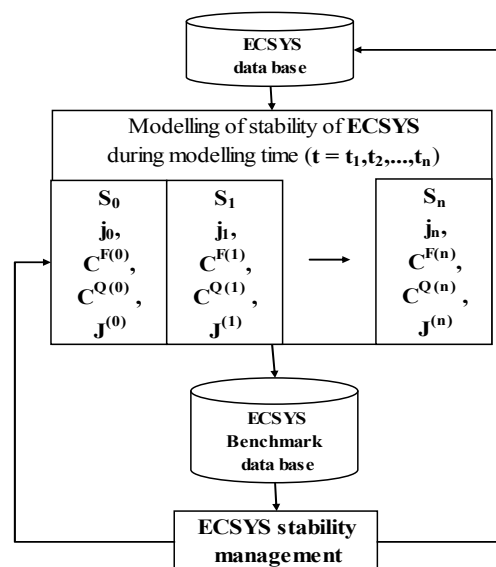


Fig. 3. Process of modelling of ECSYS stability

In Fig. 3 S_i – state of ECSYS in moments of time t_i ; $i = 0, 1, \dots, n$; n – number of states of ECSYS; j – index of the participant of the logistics process; j_i – number of participants of the logistics process at the moment of time t_i , ($j = 0, 1, \dots, m$); $J^{(i)}$ – integrated criterion of the system stability at the moments of time t_i , ($i = 0, 1, \dots, n$).

The complex criterion of financial stability ECSYS $C^{F(i)}$ is the financial stability of j -th participant of ECSYS taking part in the logistics process at the moment of time t_i . Under favourable conditions of ECSYS performance at the moment of time t_i , in the system the issue of insolvency of ECSYS participants should not arise. That is the balance (B_{ij}) of any ECSYS participant at the moment of time t_i is a positive value:

$$B_{i,j} > 0. \quad (3)$$

The complex criterion of the financial stability of ECSYS may be presented as a function:

$$C^{F(i)} = f_1(V_{(-)}^{i,j}, n_{(-)}^{i,j}, \omega), \quad (4)$$

where $C^{F(i)}$ – complex criterion of financial stability of ECSYS at the time moment t_i ; $V_{(-)}^{ij}$ – normalized criterion of the insolvency of j -th ECSYS participant at the time moment t_i , should satisfy the inequalities:

$$-1 \leq V_{(-)}^{i,j} \leq 0; \quad (5)$$

$n_{(-)}^{ij}$ – number of insolvent ECSYS participants at the time moment t_i ; ω – random factor.

Modelling of financial stability is directed towards defining the value of the "zones of risk" when the logistics system for meeting financial liabilities should use financial reserves, as well as for finding the point of first time of no negativity of the financial flow. The process of modelling of the financial flow during the modelling time is described in detail in papers. In real logistics systems there are problems with holding payments in the case of transactions between ECSYS participants. The breach of the contract and/or partial fulfilment of financial contracts by one of the participants of ECSYS lead to breaking of the financial stability of the whole system. Thus, it is offered to create and use the financial reserves of the system (Res^{ij}) for ensuring the financial stability of ECSYS. The complex criterion of financial stability of ECSYS, taking into account the financial reserves $C_{Res}^{F(i)}$, may be presented as a function:

$$C_{Res}^{F(i)} = f_1(V_{(-)}^{i,j}, n_{(-)}^{i,j}, \omega, Res^{i,j}), \quad (6)$$

where R_i – the total amount of resources in ECSYS at the moment of time t_i .

The modelling process of ECSYS stability is implemented applying a set of alternative strategies of ECSYS performance by using the dynamic programming and benchmarking method. The introduction of a set of alternative strategies supports stable functioning of ECSYS in the conditions of uncertainty. Thus, the integrated criterion $J^{(i)}$ changes its values in the feasible region:

$$\min J_j^i(t) \leq \sum J_j^i(t) \leq \max J_j^i(t). \quad (7)$$

The change of criteria of ECSYS stability is a signal for adjusting the functioning strategy of ECSYS. It means the necessity arises to implement another strategy which may be selected from the set of alternative strategies.

Practical use of statistical modelling

The graphic illustration of the first time no negativity is presented in Fig. 4.

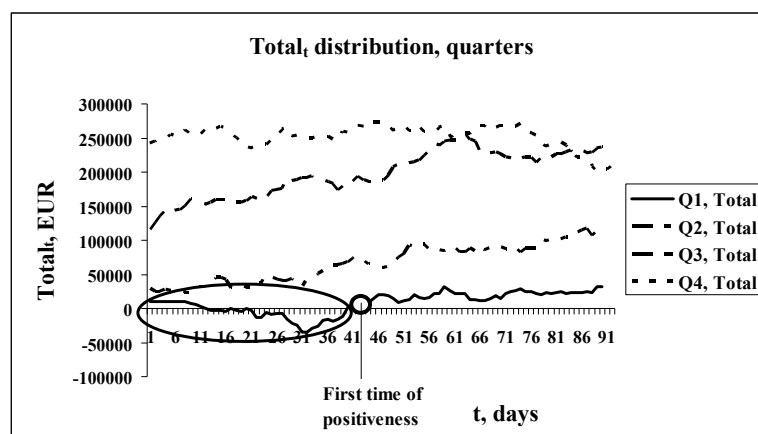


Fig. 4. Scheme of first time of no negativity

The following parameters are shown in Fig. 4:

- first time of no negativity;
- "zone of risk" of the financial stability of economic system.

The results of modelling allow to identify "zones of risk" of the financial stability of any ECSYS participant.

On the basis of the information available it is possible to consider:

- a) modelling of financial stability of ECSYS in conditions of risk or uncertainty;
- b) identification of "zones of risk" in management of financial stability of ECSYS in conditions of risk or uncertainty by Monte-Carlo method. For modelling the financial stability of ECSYS the following variables are used:

ω_{1i} – the period of time in days between actual (modelled) term of receipt of payment on the account of firm (T_2) from the i -th consignor (consignee) of the cargo and planned (in accordance with the contract terms signed) term of receipt of payment on the account of ECSYS for the cargo transportation and registration services from the point of dispatch to the point of destination (T_1);

ω_{2j} – the period of time in days between the modelled term of payment by the ECSYS the account to the j -th participant of ECSYS and planned (in accordance with the contract terms signed) term of payment to the j -th participant of ECSYS for the services rendered.

Conclusion

The modern economic analysis basing on the using of information technologies shows that in the real systems the parameters describing the economic objects, not always have the Gauss distribution. The nonlinear dependence exists between various factors. In these cases it is impossible to use the linear correlation coefficient for evaluation of measure of dependences between factors. It requires using another method for evaluation the measure of dependences between factors.

In our days, designing real economic systems very much popular is becoming the use of copulas, which fully characterizes the nonlinear connection between main factors of the model and allows uniting margin functions into multivariate distribution function. The application of modelling is connected with the fact that frequently it is not possible to provide a definite description of the behaviour of the economic system being investigated.

The introduction of a set of alternative strategies supports stable functioning of economic system in the conditions of risk or uncertainty. By using Monte Carlo method and multivariate copula method for modelling it has become possible:

- to set alternative strategies of economic system performance;

- to combine different marginal distributions using copula method;
- to model economic system stability using multimodal and nonparametric technique;
- to model the “risk zones” in which the stability of economic system has been distorted;
- to manage functioning of economic system.

The theoretical and practical results obtained as a result of this research can be applied in practical activities of companies and in training process.

References

1. **Jurenoks V., Jansons V., Didenko K.** Modelling of financial stability in logistics in conditions of uncertainty // 21-st European Conference on Modelling and Simulation, June 4–6, 2007, Prague, Czech Republic. P. 30 – 36.
2. **Jurenoks V., Jansons V., Didenko K.** Modelling of Multimodal Flows in Logistic Using of Nonparametric Method., International Mediterranean Modelling Multiconference, MAS 2007, October 4–6, 2007, Bergeggi, Italy. P. 376 – 381.
3. **Jurenoks V., Jansons V., Didenko K.** Modelling of Stability of Economic Systems Using Benchmarking and Dynamic Programming // X International Conference on Computer Modelling and Simulation EUROSIM/UKSim, April 1–3, 2008, Cambridge, United Kingdom. P. 311 – 316.
4. **Jurenoks V., Jansons V., Didenko K.** Investigation of Economic Systems using Modelling Methods with Copula // XI International Conference on Computer Modelling and Simulation UKSim 2009, March 25–27, 2009, Cambridge, United Kingdom. P. 311– 316.
5. **Jansons V., Jurenoks V., Didenko K.** Investigation of Economic Systems using Modelling Methods with Copula // The 13-th International Conference on Harbor Maritime Multimodal Logistics Modelling & Simulation HMS 2011, October 13–15, 2010, Fez, Morocco. P. 1–6.
6. **Lindskog F.** Modelling Dependence with Copulas, Master Thesis-MS-2000-06, Department of Mathematics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
7. **Embrechts P., Lindskog F., McNeil A.** Modelling dependence with copulas and applications to risk management // Handbook of Heavy Tailed Distributions in Finance, Ed. E. Rachev, 2003. Elsevier. P. 329–384.

**ПОЛИМОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И ОПТИМИЗАЦИЯ
СЛОЖНЫХ ЭРГОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ****А. В. Алексеев, К. М. Орлов (Санкт-Петербург)**

Активное внедрение методов моделирования сложных эрготехнических систем (ЭТС), в том числе широкого спектра методов имитационного и комплексного моделирования, в теорию и практику решения актуальных задач развития и укрепления научно-производственного потенциала РФ неизбежно влечёт за собой необходимость адекватной оценки качества этих ЭТС с возможностью их последующей структурно-функциональной и параметрической оптимизации. Вместе с тем именно эта задача в целом ряде случаев сводится к оценке отдельных показателей качества без должного их системного и методического обоснования, что существенно ограничивает возможности анализа и синтеза ЭТС в целом, а тем более использования результатов моделирования их функционирования, комплексного моделирования качества ЭТС. Это обстоятельство имеет особое значение при обосновании проектных и управленческих решений (ПУР), а также путей развития сложных ЭТС в военно-промышленной области при обосновании высокотехнологичных и конкурентных ЭТС и программ их развития.

Среди возникающих при этом научных и практических задач *важное место и ключевую роль* занимает решение проблемы достоверной количественной и сравнительной комплексной оценки функционального качества ЭТС, а также качества используемых моделей, качества рекомендуемых путей практического применения моделей и средств их реализации при управлении процессами и объектами моделирования.

Одним из возможных и перспективных направлений решения данной проблемы, в том числе для объектов морской инфраструктуры, сложных корабельных и береговых автоматизированных комплексов и систем, является проведение рейтинг-анализа средств по технологии полимодельной квалиметрической ранговой оптимизации ПУР (технологии КРОПУР) и её последующего развития (технология АСОР) [1–5].

В рамках настоящих исследований с целью всестороннего комплексного анализа возможностей и преимуществ одновременного использования ряда моделей (реализации соответствующего *полимодельного подхода*) были обобщены результаты решения ряда практических задач и формирования баз данных квалиметрического сравнения качества следующих классов технических средств:

- обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем обработки информации (АСЗИ), включая средства разграничения доступа, межсетевого экранирования, VPN-средства, средства сканирования и анализа информационной безопасности, мониторинга-управления информационной безопасностью, защиты от вредоносных кодов (антиспамовые, антивирусные средства), шифрования-дешифрования данных, систем электронной цифровой подписи;
- обеспечения автоматизированного конструирования (класса CAD/CAM/CAE); обеспечения электронного документооборота (СЭД) общей и технической документации при общем объёме базы данных более 50 вариантов СЭД;
- обеспечения управления ресурсами предприятия (класса ERP) при общем объёме базы данных по альтернативным вариантам сравнения более 30;
- обеспечения автоматизированного управления, в том числе функционирующих в условиях сетецентрического противоборства и другие.

Актуальность данного класса квалиметрических исследований обусловлена, как известно, проблемой большого числа возможных альтернативных решений (многовариантностью и многокритериальностью анализа и синтеза), в том числе представленных на современном рынке, соответствующей сложностью выбора предпочтительных,

а тем более – *оптимальных* (как лучших из возможных) *вариантов* создания и использования технических средств обеспечения объектов автоматизации с обязательным учётом влияния «человеческих» факторов, т.е. эрготехнических систем.

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты полимодельного (для 6 моделей предпочтений частных показателей качества) квалиметрического анализа и ранжирования (рейтинг-анализа) основных представителей класса систем электронного документооборота, представляющих собой главную («кровеносную») систему обеспечения деятельности каждой организации и предприятия.

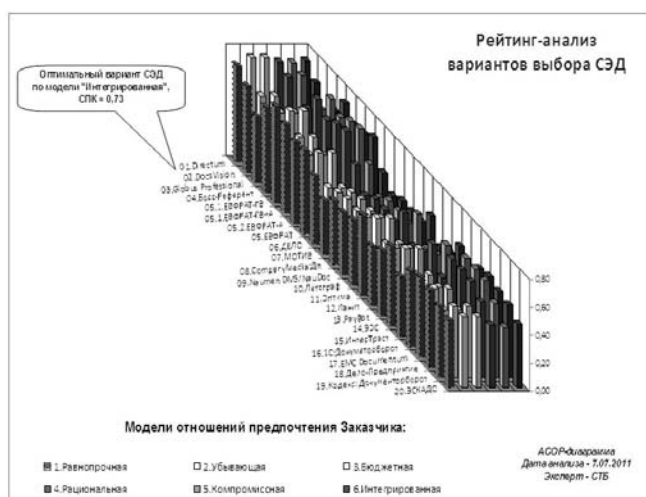


Рис. 1. Результаты полимодельного сравнительного анализа качества СЭД

На рис. 2 приведена соответствующая система критериев оценки качества в порядке их значимости (в ранжированном виде по критериям 1...10), а также характерный диапазон изменения значений соответствующих показателей и единицы их измерения. Следует при этом отметить независимость используемых критериев и их физическую разнородность. С другой стороны, сводный показатель качества (СПК, критерий 11) СЭД, изменяющийся в диапазоне значений [0; 1], позволяет оценивать и сравнивать (как результат агрегирования векторных критериев (их скаляризации) качества) качество ЭТС как количественную меру их свойств в обобщённом по критериям 1...10 виде. В формализованном виде СПК ЭТС может быть представлен трехуровневой комбинированной (аддитивно-мультипликативно-аддитивной) моделью вида

$$Q = \sum_{m=1}^M (\gamma_m \times Q_m) = \sum_{m=1}^M \left[\gamma_m \times \left(\prod_{k=1}^K Q_{m,k}^{\beta_{m,k}} \right) \right] = \sum_{m=1}^M \left\langle \gamma_m \times \left\{ \prod_{k=1}^K \left[\sum_{l=1}^L (\alpha_{k,l} \times q_{k,l}) \right]^{\beta_{m,k}} \right\} \right\rangle,$$

где $m \in [1; M]$ – номер модели полимодельного (по всем M моделям) оценивания СПК ЭТС Q на основе агрегирования (скаляризации) векторных критериев качества Q_m , соответствующих оценкам СПК по m -й из M моделей. Назовём для удобства Q_m **модельным СПК** в отличие от показателя Q , который будем называть **полимодельным СПК**. Физически СПК Q определяет основные *системные свойства ЭТС* при оценке по *аддитивному критерию* скаляризации Q_m и весовых индексах γ_m (коэффициентах важности соответствующих модельных СПК Q_m), причём, $\sum_{m=1}^M \gamma_m = 1$; $k \in [1; K]$ – номер модели оценивания *групповых (ключевых) по k из K СПК ЭТС $Q_{m,k}$* , определяющих

их характерные k -свойства (при оценке модельного СПК Q_m по m -й модели) и агрегируемых по мультипликативному критерию скаляризации $Q_{m,k}$ при весовых индексах $\beta_{m,k}$ (показателях степени), причём, $\sum_{k=1}^K \beta_{m,k} = 1$; $l \in [1; L]$ – номер частного по l из L показателей качества ЭТС $q_{k,l}$, агрегируемых в групповой (ключевой) СПК $Q_{m,k}$ (при оценке модельного СПК Q_m по m -й модели) по аддитивному критерию при весовых индексах $w_{k,l}$, причём, $\sum_{l=1}^L w_{k,l} = 1$.

В частности, график на рис. 1 показывает, что для различных m -моделей предпочтений СПК (от «1.Равнопрочная» до «6.Компромиссная») максимальное значение модельный СПК Q_m имеет для вариантов СЭД, не совпадающих по m . Выбор оптимального варианта, например, по критерию максимума полимодельного СПК Q по $M = 5$ моделям предпочтений возможен (модель «7.Интегрированная», СЭД «DIRECTUM», СПК = 0,73) при соответствующем задании критерия оптимизации.

Критерии оценки качества СЭД ТД

1. Обобщённый уровень качества по данным системы сертификации, $ОУС = [0; 8]$
2. Функциональная полнота, $ФП = РДВфп / (7...12)$, %
3. Качество решения задач 1...7, $Qpз = a_1 * q_1 + a_2 * q_2 + ...$, %
4. Эффективность решения задач 1...7, $W = Q/Q_{max}$, %
5. Защищённость СЭД ТД, $S = [0; 1]$
6. Дружелюбность интерфейса, $DI = [0; 1]$
7. Качество комплексности автоматизации, сопряжения с CAD/CAM/CAE, PLM, ERP, ..., %
8. Срок внедрения (месяцев), $T = [3; 40]$
9. Успешность внедрения, $УВ = u_1 * V_1 + u_2 * V_2 + ...$, %
10. Стоимость владения (т. руб.), $C = [20; >10000]$
11. Сводный показатель качества СЭД ТД, $Q = [0; 1]$

Рис. 2. Система критериев и показателей анализа качества СЭД

На рис. 3 приведены аналогичные результаты для квалиметрического рейтинг-анализа (ряда TOP-30) технических средств защиты информации класса средств виброакустической защиты информации (ТСЗИ – АВЗ) по 6 указанным моделям предпочтений без использования моделей типа «7.Интегрированная».

Опыт проведения многовариантных исследований качества широкого спектра ЭТС позволяет прежде всего отметить особую важность и конструктивность:

1. Использования системных аспектов, методологии и технологии проведения анализа качества структурно и функционально сложных ЭТС [5–7], в том числе с использованием результатов имитационного моделирования их функционирования.

2. Анализа динамики при синтезе качества ЭТС (исследовательском проектировании оптимального вариантов) эмерджентных свойств, характеризующих качество взаимосвязей элементов в составе ЭТС и их влияние на комплексные свойства ЭТС.

3. Синтеза эффективных алгоритмов управления при обосновании качества ПУР на основе данных квалиметрического анализа, что указывает на актуальность и целесообразность комплексного квалиметрического мониторинга управления качеством ЭТС, в том числе при имитационном моделировании их функционирования.



Рис. 3. Результаты полимодельного сравнительного анализа качества ТСЗИ-АВЗ

4. Использования концепции полимодельного анализа-синтеза ПУР, обеспечивающей многоаспектный (полимодельный) и комплексный учёт особенностей разработки и эксплуатации ЭТС с соответствующим многокритериальным методическим аппаратом и технологией автоматизированной поддержки принятия ПУР, например, с использованием систем класса АСППР типа «ASPID», «КРОПУР», «АСОР» [1, 2, 4].

5. Обоснования и прежде всего оптимизации ПУР, подлежащих внедрению при создании современных структурно и функционально сложных ЭТС, что обеспечивает их эффективное и безопасное, в том числе катастрофоустойчивое использование.

6. Комплексного моделирования и анализа качества ЭТС при различных вариантах их построения и использования, а также ранжирования. Например, число межсетевых экранов (МСЭ) на рынке средств защиты информации (СЗИ) сегодня согласно Госреестру сертифицированных СЗИ составляет более 180, выбор наиболее предпочтительных из которых представляет собой весьма сложную проблему в связи с отсутствием в доступной литературе необходимых сведений для их сравнения и ранжирования.

7. Комплексного анализа факторов и проблем, а также обоснования программ внедрения новых технологий и ПУР с учётом «операторского компонента» ЭТС, т.е. «пресловутых» человеческих факторов, имеющих сегодня, как известно, ключевой характер. Один из вариантов систематизации проблем внедрения новых ПУР в ЭТС, а также предлагаемый вариант их квалиметрической оценки приведён на рис. 4.

При этом традиционно особое внимание должно уделяться систематизации критериев и показателей эффективности использования каждого типа ЭТС [6, 7]. Полимодельность задания исходных данных по отношениям предпочтений подтвердила возможность получения при рейтинг-анализе альтернативных решений более полной картины для лиц, обосновывающих (ЛОР) и принимающих ПУР (ЛПР).

В обобщённом виде схема их взаимодействия и алгоритм принятия сложных решений по проектам (m моделям) ПУР при управлении ЭТС приведена на рис. 5.

Формирование матрицы индексов интегральных критериев качества для соответствующих классов ЭТС позволяет по существу создать равные условия и сопоставимость всего ряда сравниваемых проектных решений. С другой стороны, согласование получаемых результатов с разработчиками ЭТС обеспечивает минимизацию информационного дефицита при квалиметрическом рейтинг-анализе и повышает точность задания исходных данных, а также получаемых оценок качества.



Рис. 4. Результаты полимодельного анализа качества ТЭСИ-АВЗ

Тем самым многокритериальное и полимодельное сравнение альтернативных вариантов ЭТС, их ранжирование по вариантам построения и эксплуатации, прежде всего по результатам моделирования функционирования сложных ЭТС, позволяет обеспечить *системное комплексное обоснование их развития*, мониторинг системных показателей качества ЭТС с *формированием соответствующих баз данных и знаний* (БДЗ), динамики их наращивания, что имеет особо важное значение для сложных ЭТС.



Рис. 5. Алгоритм и технология принятия сложных решений при управлении ЭТС

В свою очередь, формирование БДЗ ЭТС обеспечит качественно новый уровень организации и проведения сертификации средств, аттестации объектов информатизации, профессиональную подготовку и лицензирование юридических и физических лиц.

Более того, поиск на основе полимодельной квалиметрической оценки и анализа предпочтительных и оптимальных ПУР обеспечивает обоснование перспективных направлений развития ЭТС, формирование бизнес-стратегий развития компаний в целом.

Особое значение полученные результаты и формирование БДЗ рейтинг-анализа ЭТС имеют в связи с учётом в технологии КРОПУР, АСОП используемой и непрерывно актуализируемой системы альтернативных моделей предпочтений заказчиков.

Пожалуй, наибольшую пользу для разработчиков-проектировщиков и управленцев различных уровней изложенный подход к квалиметрическому сравнению вариантов проектного выбора принесет при использовании и актуализации (по результатам модельных и натурных испытаний) подобных БДЗ и их публикации испытательными лабораториями и органами сертификации для различных ведомств и корпораций.

Приведенные полимодельные оценки количественно подтвердили то важное обстоятельство, что системные аспекты внедрения ПУР при развитии сложных ЭТС являются наиважнейшими и требующими непереносимого системно обоснованного учёта при развитии сложных комплексов и их систем.

Литература

1. **Алексеев А. В.** Технология оптимизации проектных и управленческих решений при создании автоматизированных систем объектов морской инфраструктуры в защищённом исполнении//Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2009). СПб., 2009.
2. **Алексеев А. В.** Технология и программный комплекс квалиметрической ранговой оценки качества сложных информационно-аналитических систем//Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении – 2008». СПб, 2008.
3. **Антимонов С. Г., Сердюк В. А., Алексеев А. В., Калинин И. В.** Новые подходы к выбору средств антивирусной защиты при поддержке принятия комплексных проектных решений по обеспечению информационной безопасности//Сб. докл. V Юбилейной Всероссийской конференции «Обеспечение информационной безопасности. Региональные аспекты. 2006.», 12-16.09.2006, Сочи. – М.: Академия информационных систем, 2006.
4. **Алексеев А. В.** Технология квалиметрической ранговой оптимизации проектных и управленческих решений//Труды Международной научной школы «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах (МА БР-2007)», СПб.: ГОУ ВПО «СПбГУАП», 2007.
5. **Алексеев А. В.** Оптимизация проектных и управленческих решений при комплексном обеспечении безопасности большого города//Безопасность большого города / Сб. ст. под ред. Э.И.Слепяна. СПбю: Изд-во Сергея Ходова, 2007.
6. **Алексеев А.В., Орлов К.М.** Квалиметрическая оценка подсистем визуализации и обработки информации корабельных автоматизированных систем управления //Состояние, проблемы и перспективы разработки корабельных информационно-управляющих комплексов (эффективность, надёжность, экономика). Сб. докл. научно-техн. конф. М.: ОАО «Концерн “Моринформсистема-Агат”», 2011.
7. **Орлов К. М.** Формирование системы оценки качества визуализации информации автоматизированных систем в защищённом исполнении. СПб: СПИИРАН, 2010.

**ПРОБЛЕМА СОЧЕТАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ
ВЕЛИЧИН В GPSS-МОДЕЛЯХ****Т. И. Алиев, Г. К. Асафьев (Санкт-Петербург)****Введение**

Точность результатов имитационного моделирования, базирующегося на методе статистических испытаний, в значительной степени зависит от качества применяемых генераторов псевдослучайных величин.

Одной из наиболее апробированных и широко распространенных систем имитационного моделирования является GPSS и, в частности, одна из версий, реализованная в среде Microsoft Windows, GPSS World [1], в которой используется встроенный генератор равномерно распределённых в интервале (0;1) псевдослучайных величин. Последовательность формируемых в процессе моделирования значений псевдослучайных величин зависит от задаваемого в качестве параметра целочисленного начального значения, что позволяет говорить о множестве используемых в GPSS World генераторов случайных величин, которые будем обозначать как 1, 2, 3, ... Кроме того, в GPSS World имеется более 20 библиотечных процедур для формирования случайных величин с заданными законами распределений, базирующихся на встроенных генераторах равномерно распределённых величин.

Длительная история существования и развития GPSS и её широкое применение в различных областях, казалось бы, даёт все основания полагать, что встроенные генераторы случайных величин обладают отменным качеством и могут использоваться при разработке любых моделей со случайным характером функционирования. При этом считается, что погрешности результатов имитационного моделирования при достаточно большой и обоснованно выбранной длительности моделирования обычно не превышают 3–5%.

В процессе эксплуатации GPSS World было выявлено, что в высокозагруженных моделях массового обслуживания (загрузка 0,8 и более) при некоторых сочетаниях генераторов случайных величин, используемых для формирования значений интервалов между поступающими в систему заявками и длительностей обслуживания заявок, погрешность результатов имитационного моделирования может составлять 30% и более даже для самых простых моделей, причём при использовании других сочетаний встроенных генераторов эта погрешность при той же длительности моделирования, задаваемой числом прошедших через систему заявок, составляет менее 3%.

Для выяснения обстоятельств, связанных с появлением такого эффекта, было проведено исследование генераторов псевдослучайных величин с целью оценки качества используемых генераторов и выявления закономерностей при использовании различных сочетаний, обуславливающих высокую погрешность результатов моделирования. Исследование проводилось в несколько этапов.

На первом этапе были выявлены так называемые проблемные сочетания генераторов, при использовании которых погрешность результатов моделирования оказывается значительной.

Для объяснения возникающей погрешности были протестированы проблемные встроенные генераторы равномерно распределённых случайных величин и библиотечные генераторы на соответствие декларируемым законам распределения [2].

Поскольку большая погрешность моделирования возникает только при использовании некоторых конкретных сочетаний генераторов, необходимо было выполнить корреляционный анализ соответствующих последовательностей случайных значений,

рассчитать коэффициенты корреляции и сравнить эти коэффициенты для проблемных и непроблемных сочетаний генераторов случайных величин.

На последнем этапе была проанализирована зависимость результатов моделирования, а именно среднего времени ожидания заявок в системе, от длительности моделирования, задаваемого количеством заявок, прошедших через модель.

Описание экспериментов

Для исследования погрешностей результатов имитационного моделирования при различных сочетаниях генераторов псевдослучайных последовательностей использовались GPSS-модели одно- и многоканальных систем массового обслуживания (СМО) с накопителем неограниченной ёмкости и однородным потоком заявок.

Для выявления проблемных сочетаний генераторов, при использовании которых погрешность результатов моделирования оказывается значительной, использовались СМО типа M/M/1, M/G/1 и M/M/2, поддающиеся точному аналитическому расчету [2]. При варьировании загрузки систем от 0,1 до 0,9 с шагом 0,1 и пропуске через каждую модель по 1 млн. заявок, было определено, что погрешность результатов моделирования лежит в приемлемых пределах (1–5%) для значений загрузки примерно до 0,7. Начиная со значения загрузки 0,8, при некоторых сочетаниях генераторов случайных величин погрешность начинала расти и составляла 10% и более, а при загрузке системы 0,95 – достигала 40%. Поскольку при исследовании в компьютерных сетях реальных систем, например маршрутизаторов, коммутаторов, серверов, наибольший интерес обычно представляют сведения о качестве функционирования системы при большой загрузке, задача обеспечения приемлемой точности в процессе имитационного моделирования становится весьма актуальной. В связи со сказанным все последующие эксперименты выполнялись для систем, загрузка которых составляла 0,9 и 0,95.

Для указанных значений загрузки системы было выполнено более 10 тысяч экспериментов при различных сочетаниях генераторов с номерами от 1 до 100 и определены сочетания генераторов, при которых достигается наибольшая погрешность результатов моделирования. В процессе экспериментов было установлено, что погрешность результатов моделирования зависит только от загрузки системы и длительности моделирования, задаваемого количеством заявок, прошедших через систему, и не зависит от соотношения составляющих загрузки – интенсивности поступления заявок и средней длительности их обслуживания. Кроме того, было установлено, что использование проблемных сочетаний генераторов случайных величин приводит к значительным погрешностям результатов моделирования для других, более сложных моделей, в частности для многоканальных СМО при любых законах распределений, использующих эти генераторы.

Проблемные сочетания генераторов

На модели M/M/1 с однородным потоком заявок и загрузкой 0,9 было проведено 10 000 экспериментов с целью выявления всех проблемных сочетаний генераторов с номерами от 1 до 100. В каждом эксперименте через модель пропускался 1 млн. заявок. Относительная погрешность имитационного моделирования рассчитывалась для среднего времени ожидания заявок как $\delta = \frac{w^* - w}{w}$, где w^* – значение, полученное в процессе имитационного эксперимента; w – точное значение, рассчитанное для СМО M/M/1 с коэффициентом загрузки 0,9.

Для большинства сочетаний погрешность не превышала 5%. В то же время более 40 сочетаний выдали погрешность, превышающую 20%. В табл. 1 представлены все проблемные сочетания генераторов случайных величин, при использовании которых

погрешность среднего времени ожидания заявок в имитационной модели превышала 10% и 20%.

Таблица 1

Погрешность, %	Сочетания генераторов							
10–20	(1;2)	(3;6)	(3;9)	(4;6)	(4;12)	(5;15)	(6;3)	(6;18)
	(7;14)	(7;21)	(8;16)	(8;32)	(8;48)	(9;3)	(10;30)	(11;77)
	(12;4)	(12;6)	(13;26)	(13;65)	(14;7)	(14;42)	(15;3)	(15;5)
	(15;10)	(15;45)	(16;8)	(16;32)	(16;48)	(16;64)	(17;51)	(17;68)
	(18;6)	(19;57)	(20;5)	(20;30)	(20;60)	(20;100)	(21;7)	(21;14)
	(21;63)	(22;44)	(22;66)	(24;48)	(24;72)	(24;96)	(25;50)	(25;75)
	(26;13)	(27;9)	(27;54)	(28;56)	(29;87)	(30;6)	(30;10)	(30;20)
	(30;60)	(32;8)	(32;48)	(33;22)	(33;66)	(33;99)	(36;12)	(38;19)
	(38;76)	(39;78)	(40;8)	(40;10)	(40;80)	(41;82)	(42;6)	(42;14)
	(42;28)	(44;22)	(44;88)	(46;69)	(46;92)	(47;94)	(48;8)	(48;16)
	(48;24)	(48;96)	(50;25)	(51;17)	(60;15)	(60;20)	(60;30)	(63;9)
	(63;21)	(64;16)	(65;13)	(66;22)	(68;17)	(69;46)	(70;35)	(72;24)
	(75;15)	(76;38)	(80;40)	(82;41)	(84;12)	(84;56)	(87;29)	(88;44)
	(92;46)	(93;31)	(94;47)	(96;24)	(96;48)	(99;33)	(100;20)	(100;50)
>20	(2;1)	(4;8)	(5;10)	(8;4)	(9;18)	(10;5)	(10;20)	(12;24)
	(14;28)	(15;30)	(18;9)	(20;10)	(20;40)	(21;42)	(24;12)	(26;52)
	(28;14)	(30;15)	(31;62)	(32;16)	(32;64)	(36;72)	(37;74)	(40;20)
	(42;21)	(43;86)	(45;90)	(49;98)	(52;26)	(54;27)	(57;19)	(62;31)
	(64;32)	(66;33)	(72;36)	(74;37)	(78;39)	(86;43)	(90;45)	(98;49)

Анализ представленных результатов показывает, что наиболее проблемными являются сочетания генераторов, номера которых соотносятся как 1:2, 1:3, 2:1 или 3:1.

Большинство проблемных сочетаний генераторов были проверены также для СМО общего вида G/G/1, в частности U/U/1, и многоканальных СМО. Для сравнения в табл.2 представлены результаты имитационного моделирования при использовании различных сочетаний генераторов в СМО M/M/1, загрузка которой составляла 0,95, а длительность обслуживания была равна 9,5 единиц времени. Точное значение среднего времени ожидания в этом случае равно 180,5 ед.

Таблица 2

Генераторы	Время ожидания, ед.	Погрешность, %
(2; 1)	114,4	-36,6
(2; 2)	173,6	-3,8
(2; 4)	155,8	-13,7
(10; 20)	121,1	-32,9
(20; 10)	106,6	-41,0
(20; 40)	111,8	-38,1
(40; 20)	113,2	-37,3
(110; 40)	179,9	-0,3
(200; 400)	136,5	-24,4
(999; 40)	177,1	-1,9
(2000; 4000)	119,3	-33,9

Как видно из табл. 2, для проблемных сочетаний генераторов случайных величин, используемых для выработки значений интервалов между поступающими заявками и длительности обслуживания соответственно, погрешность результатов моделирования достигала 40%, в то время как у непроблемных сочетаний (2; 2), (110; 40) и

(999; 40) при той же длительности моделирования погрешность не превышала 5%. Более того, использование одного и того же генератора с номером 2 (2; 2) для выработки значений интервалов между поступающими заявками и длительности обслуживания позволяет получить существенно более точный результат, чем использование этого же генератора в сочетании с другим генератором. Перестановка генераторов в сочетании с (10; 20) на (20; 10) незначительно изменяет погрешность моделирования.

Тестирование генераторов

Генератор равномерно распределенных случайных величин в системах ИМ вырабатывает последовательность значений в интервале (0; 1), которая называется базовой последовательностью. Базовая последовательность используется для формирования случайных величин, распределенных по другим законам и в других интервалах. Поскольку погрешность может появиться как на этапе генерации базовой последовательности, так и на этапе получения экспоненциально распределенной величины, было проведено тестирование базовых последовательностей и последовательностей экспоненциально распределенных случайных величин.

Относительная погрешность математического ожидания для генераторов, входящих в состав проблемных сочетаний, в большинстве случаев составляла более 0,1%, в то время как для других генераторов – менее 0,1%. Этот результат справедлив как для базовых последовательностей, так и для последовательностей экспоненциально распределенных случайных величин.

Для базовой последовательности относительная погрешность среднеквадратического отклонения для всех исследованных генераторов, включая генераторы, входящие в состав проблемных сочетаний, составила менее 0,01%. Для последовательностей экспоненциально распределенных случайных величин эта погрешность оказалась больше 0,01%, а для генераторов, входящих в состав проблемных сочетаний, достигала значений 0,2% и более.

Результаты корреляционного анализа

Для того, чтобы найти ответ на вопрос, почему некоторые сочетания генераторов случайных величин дают большую погрешность результатов моделирования, был выполнен корреляционный анализ базовых последовательностей и последовательностей экспоненциально распределенных случайных величин на выборке по 1 млн значений каждого генератора. Обработка полученных результатов показала, что коэффициенты корреляций проблемных сочетаний генераторов случайных величин в 5–10 раз превышают значения коэффициентов корреляции непроблемных сочетаний, причем они принимают положительные значения, т.е. большему (меньшему) значению первого генератора соответствуют большие (меньшие) значения второго генератора. Это означает, что с большой вероятностью заявке, поступившей в систему с большим интервалом (сформированным первым генератором) от момента поступления предыдущей заявки, будет соответствовать (сформировано вторым генератором) большее время обслуживания, и, наоборот, заявке, поступившей в систему с небольшим интервалом от момента поступления предыдущей заявки, будет соответствовать меньшее время обслуживания. Вероятность же ситуации, когда заявке, поступившей в систему с маленьким интервалом, будет соответствовать большое время обслуживания, оказывается незначительной. Всё это приводит к тому, что результаты имитационного моделирования, в частности среднее время ожидания, оказываются существенно заниженными даже при достаточно длительном моделировании.

Анализ переходных процессов в модели

Для проблемных сочетаний генераторов с целью выяснения характера изменения среднего времени ожидания от длительности имитационного моделирования, задаваемого числом заявок, проходящих через моделируемую систему, были выполнены эксперименты, при которых через систему пропускалось до 100 млн. заявок, а в некоторых моделях до 200 млн. заявок. Изучение переходного процесса в СМО позволило установить, что даже при таком большом количестве заявок, пропущенных через систему, среднее время ожидания не достигало расчетного значения, а погрешность могла составлять до 10%. На рис. 1 представлены результаты имитационного моделирования СМО М/М/1 с коэффициентом загрузки 0,95 при использовании генераторов с номерами 20 и 10 (20;10) для формирования интервалов между поступающими заявками и длительностей их обслуживания соответственно. Отметим, что коэффициент корреляции генераторов 20 и 10 – положительный и равен 0,00247. Представленные графики показывают зависимости времени ожидания заявок и относительной погрешности результатов имитационного моделирования от числа заявок, прошедших через имитационную модель.

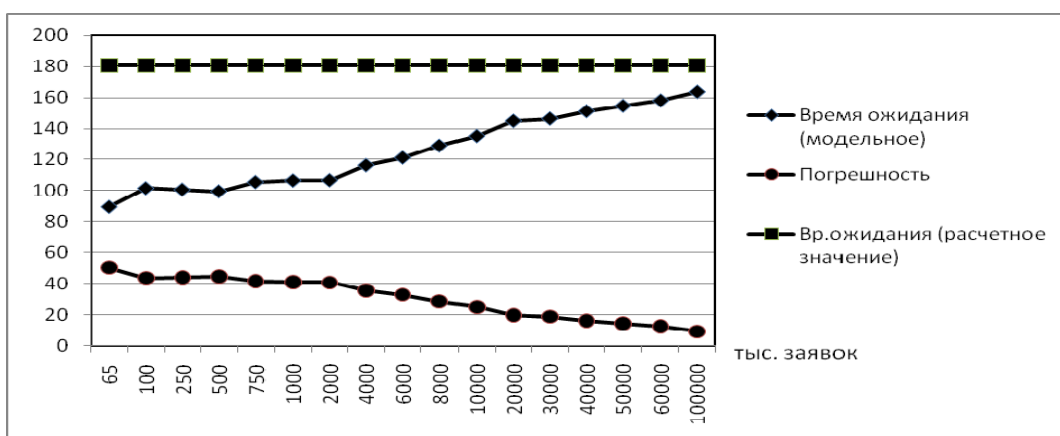


Рис. 1. Сочетание генераторов (20; 10)

Из графика видно, что даже после прохождения через модель 100 млн. заявок (что для такой простой модели непозволительная роскошь) относительная погрешность составляет около 10%.

Заметим также, что использование широко применяемого на практике метода «срезов» для определения вхождения системы в стационарный режим может привести к ошибочным результатам. Например, как видно из графика, среднее время ожидания при пропуске 100 тыс., 250 тыс. и 500 тыс. заявок остается практически неизменным (отличие менее, чем на 1%), откуда можно сделать вывод, что система вошла в стационарный (установившийся) режим и, следовательно, процесс моделирования может быть завершен. При этом погрешность результата моделирования оказывается более 40%.

Для сравнения на рис. 2. показана аналогичная зависимость для той же модели при использовании неproblemного сочетания генераторов (110; 40), откуда видно, что установившийся режим в системе существует уже после пропуска 500 тыс. заявок, и погрешность результатов моделирования в дальнейшем не превышает 4%. Следует обратить внимание на то, что такой характер зависимости модельного времени ожидания по отношению к расчетному может быть объяснён тем, что коэффициент корреляции генераторов 110 и 40 – отрицательный и равен -0,00176.

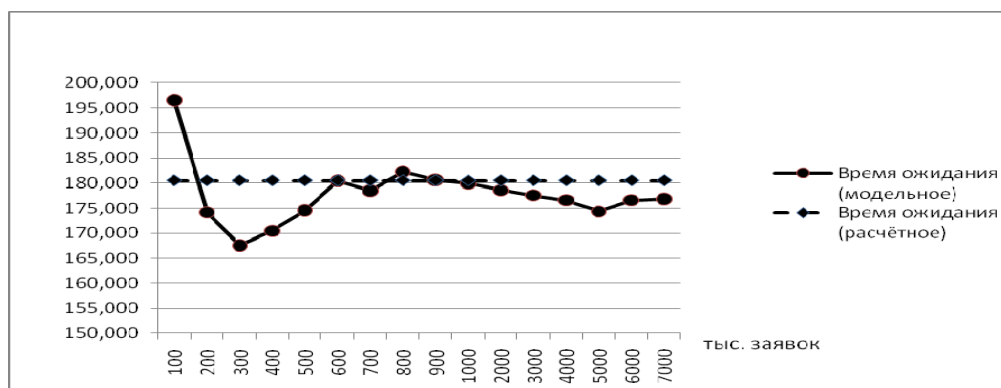


Рис. 2. Сочетание генераторов (110;40)

Выводы

1. Погрешность результатов моделирования СМО с высокой нагрузкой (0,8 и выше) в среде GPSS World при использовании определённых сочетаний генераторов случайных величин, используемых для формирования значений интервалов между поступающими в систему заявками и длительностей обслуживания заявок, может оказаться высокой и достигать десятков процентов. Результаты многочисленных (более 10 тысяч) экспериментов, выполненных для различных сочетаний генераторов с номерами от 1 до 100, позволили определить, что наибольшая погрешность достигается для сочетаний генераторов, номера которых соотносятся как 1:2, 1:3, 2:1 и 3:1.

2. Корреляционный анализ показал, что коэффициенты корреляций проблемных сочетаний генераторов случайных величин принимают положительные значения и по абсолютной величине в 5–10 раз превышают значения коэффициентов корреляции не-проблемных сочетаний, что в области больших нагрузок исследуемой системы оказывает существенное влияние на результаты моделирования.

3. Анализ переходного режима функционирования системы при использовании проблемных сочетаний генераторов случайных величин показывает, что среднее время ожидания заявок медленно увеличивается с увеличением длительности моделирования (числа заявок, пропускаемых через систему), но так и не достигает точного значения, полученного в процессе аналитического расчета, в некоторых случаях даже после прохождения 100 млн. заявок через моделируемую систему.

Литература

1. Бражник А. Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS World. СПб.: Реноме, 2006. 439 с.
2. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. СПб.: СПбГУИТМО, 2009. 363 с.

**СИНТЕЗ ПЛАНА ИМИТАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКАЗАТЕЛЕЙ
КАЧЕСТВА СУДОВЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ****Г. Е. Барщевский, А. А. Горячев (Санкт-Петербург)**

При исследовании сложных судовых автоматизированных систем (САС) необходимо учитывать неполноту априорной информации о значениях некоторых параметров САС[1].

Рассмотрим необходимость учета разброса параметров и оценки степени их влияния на примере двух видов судовых САС: судовых автоматизированных электро-энергетических систем (ЭЭС) и автоматических систем управления движением (АСУД) судов.

При исследовании и проектировании судовых автоматизированных ЭЭС необходимо учитывать технологический разброс параметров отдельных элементов ЭЭС, в частности, синхронных генераторов, асинхронных двигателей, выпрямителей и двигателей постоянного тока. Кроме того, весьма существенные ошибки возникают при определении параметров эквивалентных асинхронных двигателей, а также при недостаточно полном учете нагрузочных характеристик мощных электроприводов. Как будет показано ниже, неучет разброса параметров эквивалентной ЭЭС может привести к ошибкам расчета значений показателей качества процессов на 20–30%

Не менее важен учет неполной априорной информации о параметрах АСУД судна. В этих системах помимо разброса параметров элементов САС необходимо учитывать отсутствие точной информации о значениях параметров объектов управления современных кораблей и судов.

При оценке влияния разброса параметров необходимо совокупность значений параметров судовой ЭЭС $x_1, x_2, \dots, x_n$ рассматривать как n -мерный случайный вектор, а совокупность значений показателей качества процессов $K_1, K_2, \dots, K_n$ как m -мерный случайный вектор, определенный на множестве реализаций САС. Если расчетные значения показателей качества процессов находятся в заданных пределах, но незначительно отличаются от их максимально допустимых значений, то в результате разброса вышеуказанных параметров действительные значения этих показателей могут выйти за допустимые пределы.

Для учета влияния разброса параметров необходимо, кроме значений отдельных показателей качества, вычислять их вероятностные характеристики, т.е. математические ожидания, дисперсии, а также вероятность того, что их значения не выйдут за заданные пределы. Определение вероятностных характеристик вектора показателей в самом общем виде является чрезвычайно сложной задачей.

Применение методов статистических испытаний путем многократного моделирования процессов в САС приводит к большим затратам временных ресурсов[2]. Поэтому для решения этой задачи предлагается использовать методы планирования имитационного эксперимента, реализованного на компьютере.

Можно показать, что, если все моменты плана имитационного эксперимента будут равны соответствующим моментам законов распределения параметров, то и моменты распределения показателей качества процессов, полученных в результате обработки плана имитационного эксперимента, будут являться оценками истинных значений соответствующих моментов указанных показателей. При этом, чем больше значений моментов учитывается в плане эксперимента, тем точнее получают оценки показателей.

Планы имитационного эксперимента, содержащие ограниченное число расчетных точек, значительно меньше, чем число точек необходимых для проведения статистических испытаний

Отсюда возникает задача синтеза планов имитационного эксперимента, у которых значения нескольких четных моментов плана равны соответствующим моментам законов распределения параметров. Для решения этой задачи целесообразно пользоваться непрерывными симметричными планами эксперимента.

Непрерывным имитационным планом называется совокупность величин вида:

$$\xi = \left\{ \begin{matrix} x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(N)} \\ \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N \end{matrix} \right\}, \quad (1)$$

где $x(1), x(2), \dots, x(N)$ – точки спектра плана; ξ_i – величины, называемые относительными весами или частотами проведения наблюдений (эксперимента) в соответствующих точках плана.

В этом случае для получения требуемых значений моментов, можно менять как за счет изменения размеров отдельных конфигураций, так и за счет изменения частот проведения эксперимента в этих конфигурациях.

Наиболее простую задачу представляет собой синтез планов имитационного эксперимента собственных моментов, которые обеспечивают равенство общего и частного плана, содержащего одну конфигурацию и нулевую точку, причем конфигурации соответствует план полного (дробного) факторного эксперимента или преобразованный план Плакета–Бермана, а разрешающей способностью не менее четырех.

Запишем уравнения для двух первых четных моментов плана:

$$Na^2 \varepsilon_1 = \alpha_2; \quad Na^4 \varepsilon_1 = \alpha_4 \quad (2)$$

где N – общее число точек спектра; a – размер гиперкуба; ε_1 – частота проведения эксперимента в данной конфигурации; α_2, α_4 – второй и четвертый моменты законов распределения параметров.

Аналогичные результаты получаются для аппроксимируемой модели, представляющей собой неполный полином третьего порядка, не содержащий кубов нормированных значений переменных. Тогда для определения характеристик плана необходимо в выражении (2) вместо α_4 подставить значение α_2^2 .

Преобразовав равенство (2) получим формулы для выражения размеров гиперкуба и частот проведения эксперимента:

$$a^2 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2}; \quad \xi = \frac{\lambda_2^2}{N_1 \lambda_4}. \quad (3)$$

Так для равномерного закона распределения ($\alpha_2=1/3$; $\alpha_4=1/5$) $a=0,767$, $\varepsilon = 0,07695$; а для нормального закона ($\alpha_2=1/9$; $\alpha_4=1/27$) $a=0,481$, $\varepsilon = 0,024465$.

Рассмотрим непрерывные симметричные композиционные планы, обеспечивающие равенства не только собственных моментов имитационного эксперимента. Эти планы включают в себя две симметричные конфигурации. Нечетные моменты этих планов равны нулю, а выражения для четных моментов принимают следующий вид:

$$N_{11}a_1^2\xi_1 + N_{21}a_2^2\xi_2 = \lambda_2; \quad (4)$$

$$N_{12}a_1^4\xi_1 + N_{22}a_2^4\xi_2 = \lambda_{22}; \quad (5)$$

$$N_{11}a_1^4\xi_1 + N_{21}a_2^4\xi_2 = \lambda_4. \quad (6)$$

где N_{11}, N_{12} – число точек спектра 1-й конфигурации, в которой пары параметров принимают ненулевые значения; N_{21}, N_{22} – число точек спектра 2-й конфигурации, в которой соответственно пары и тройки параметров принимают ненулевые значения; a_1, a_2 – размер конфигурации; ξ_1, ξ_2 – частота проведения эксперимента в данной конфигурации.

Решив систему уравнений (2), (3), получим следующие выражения для частот проведения эксперимента в отдельных конфигурациях:

$$\begin{aligned}\xi_1 &= \frac{N_{21}\lambda_{22} - N_{22}\lambda_4}{a_1^4(N_{12}N_{21} - N_{11}N_{22})}; \\ \xi_2 &= \frac{N_{12}\lambda_4 - N_{11}\Phi^2}{a_2^4(N_{12}N_{21} - N_{11}N_{22})}.\end{aligned}\quad (7)$$

Для синтеза плана необходима положительность частот, соответствующих точкам спектров первой и второй конфигураций.

Введем понятие приведенных моментов плана эксперимента. Приведенные моменты четвертого порядка будут определяться следующим выражением:

$$\lambda_4^{(1)} = \frac{N_{11}(N_{21}\lambda_{22} - N_{22}\lambda_4)}{N_{12}N_{21} - N_{11}N_{22}}; \quad \lambda_4^{(2)} = \frac{N_{21}(N_{12}\lambda_4 - N_{11}\lambda_{22})}{N_{12}N_{21} - N_{11}N_{22}}. \quad (8)$$

Как видно из (8) выражения для приведенных моментов зависят только от характеристик конфигураций, входящих в спектр плана эксперимента, и от значений четвертых моментов законов распределения исследуемых параметров.

Подставив выражения для приведенных моментов в (8), можно уравнение, связывающее размеры конфигураций с приведенными моментами четвертого порядка и моментом второго порядка, записать в каноническом виде:

$$\frac{\lambda_4^{(1)}}{a_1^2} + \frac{\lambda_4^{(2)}}{a_2^2} = \lambda_2. \quad (9)$$

Ввиду того, что четные моменты плана всегда положительны, уравнение (9) имеет решение только при выполнении следующих соотношений:

$$a_1^2 > \frac{\lambda_4^{(1)}}{\lambda_2} a_2^2; \quad a_2^2 > \frac{\lambda_4^{(2)}}{\lambda_2}.$$

Определим условия баланса частот. С этой целью, выразив a_2 через a_1 и подставив выражения для частот проведения эксперимента (7), получим:

$$\frac{N_1}{N_{11}} \frac{\lambda_4^{(1)}}{a_1^4} + \frac{N_2}{N_{21}} \frac{\lambda_4^{(2)}(\lambda_2 a_1^2 - \lambda_4^{(1)})^2}{(\lambda_4^{(2)})^2 a_1^4} \leq 1. \quad (10)$$

Решив неравенство (7), получим допустимые пределы изменения a_1^2 :

$$\frac{\lambda_4^{(1)}}{\Phi - \frac{\lambda_4^{(2)}}{\lambda_2} \frac{N_{21}}{N_2}} - c < a_1^2 \leq \frac{\lambda_4^{(1)}}{\lambda_{22} - \frac{\lambda_4^{(2)}}{\lambda_2} \frac{N_{21}}{N_2}}, \quad (11)$$

$$\text{где } c = \frac{\left(\frac{N_1}{N_{11}} \frac{\lambda_4^{(1)}}{a_1^4} + \frac{\lambda_4^{(1)2}}{\mu^{(2)}} - N_{11} \frac{N_1}{N_{11}} \frac{N_2}{N_2^1} \Phi^2 \frac{\lambda_4^{(1)}}{\lambda_4^{(2)}} \right)^{1/2}}{\frac{N_2}{N_{21}} \frac{\mu_2^2}{\lambda_4^{(2)}} - 1}.$$

Рассмотрим наиболее часто используемый центральный композиционный план, включающий в себя гиперкуб размером a_1 и один комплект звездных точек размером a_2 . Можно легко показать, что для этого плана вышеприведенные выражения и соотношения существенно упрощаются. Так выражения для приведенных моментов и частот проведения эксперимента равны:

$$\begin{aligned}\lambda^{(2)} &= \lambda_{22}; \lambda^{(2)} = \lambda_4 - \lambda_{22}; \\ \xi_1 &= \frac{\lambda_{22}}{2^{n-p} a_1^4}; \xi_2 = \frac{\lambda_4 - \lambda_{22}}{2 a_2^4}.\end{aligned}\quad (12)$$

Уравнение (9) принимает вид:

$$\frac{\lambda_{22}}{2^{n-p} a_1^4} + \frac{\lambda_4 - \lambda_{22}}{2 a_2^4} = \lambda_{22}. \quad (13)$$

Условие баланса частот:

$$\frac{\lambda_{22}}{\lambda_2 - \frac{\lambda_4 - \lambda_{22}}{\lambda_2 n}} - c < a_1^2 \leq \frac{\lambda_{22}}{\lambda_2 - \frac{\lambda_4 - \lambda_{22}}{\lambda_2 n}} + c, \quad (14)$$

где
$$c = \frac{\lambda_2}{\frac{\lambda_{22} n}{\lambda_4 - \lambda_{22}} - 1}. \quad (15)$$

Можно показать, что, исходя из приведенных ограничений, для ЦКП пределы изменения гиперкуба будут определяться неравенством:

$$\lambda_2 < a_1^2 \leq \frac{(n-1)\lambda_2 + \frac{\lambda_4}{\lambda_2}}{(n+1)\lambda_2 - \frac{\lambda_4}{\lambda_2}} \lambda_2. \quad (16)$$

Если моменты плана эксперимента должны быть равны соответствующим моментам равномерного закона распределения параметров, то указанное неравенство примет вид:

$$0,333 < a_1^2 \leq \frac{5n+4}{3(5n-4)}. \quad (17)$$

В частности наибольшие размеры гиперкуба при равномерном распределении исследуемых параметров меняются от 0,882 при $n=2$ до 0,647 при $n=7$. Для остальных законов распределения эти ограничения носят еще более жесткий характер.

На основе вышеприведенных выражений могут быть определены размеры конфигураций и частоты проведения эксперимента любых симметричных планов вычислительного эксперимента с заданными значениями моментов.

Указанный подход был использован для определения вероятностных характеристик САС со статическими выпрямителями.

Литература

1. **Ермаков В. В.** Математическая теория планирования эксперимента. М., 1983.
2. **Зубарев Ю. Я.** Планирование вычислительного эксперимента. СПб.: Энергоатомиздат, 2000.

**КАУЗАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ – МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ****Ю. В. Березовская, В. А. Воробьёв (Архангельск)****Введение**

Сложная система моделируется популяцией автоматов.

Популяция автоматов – это система взаимодействующих вероятностных автоматов (не обязательно одинаковых), в которых смена состояний отдельного автомата обусловлена состояниями некоторых других автоматов. А именно, состояния «воздействующих» автоматов влияют на «изменяемые» автоматы и переводят их в новые состояния, причём способ передачи воздействий и связи между автоматами не рассматриваются. Вместо этого принята гипотеза *сильного перемешивания*, т.е. автомат в данном состоянии находится в любом месте системы равновероятно. Автомат может, как обычно, менять состояние сам, а может зависеть от любого числа автоматов, находящихся в подходящих состояниях.

Популяции автоматов пригодны для исследования разнообразных массовых объектов: биологических, экономических, социальных и технических систем, параллельных программ [1–3]. С этой целью автоматы должны иметь стохастические характеристики – вероятности переходов в каждом такте. Поскольку число состояний популяции чрезвычайно велико, вычисления проводятся не для всех состояний популяции, а для среднего числа автоматов в различных состояниях. Таким образом, полученный случайный процесс представляет динамику популяции «в среднем».

Трудность состоит в том, что в известном методе динамики средних все компоненты независимы друг от друга. Между тем основное свойство, которое влияет на поведение популяции – взаимодействия между автоматами. Следует как-то учесть эти взаимодействия в методе динамики средних. В настоящей работе вводятся основные понятия, опирающиеся на теорию сетей Петри.

1. Каузальная сеть для популяции автоматов

Каузальная сеть – это маркированная сеть Петри, в которой для каждого перехода задана интенсивность события-перехода как функция от маркировки входных позиций перехода. Вид этих функций зависит от предметной области и задаётся отдельно в каждом конкретном случае. Поток событий-переходов простейшие, т.е. стационарные (интенсивности меняются медленно), ординарные и без последствий.

Каузальная сеть – это двудольный граф $G = \langle Q, D, In, Out, M, R \rangle$, где

$Q = \{q_i \mid i = 0, 1, \dots, n\}$ – множество позиций, соответствующее множеству состояний, на которых определены все автоматы;

$D = \{d_j \mid j = 1, 2, \dots, m\}$ – множество переходов автоматов из состояния в состояние;

In – функция предшествования, ставит в соответствие каждой паре (q_i, d_j) неотрицательное число $k_{ij} \geq 0$, где k_{ij} – вес дуги из позиции q_i в переход d_j , если соответствующей дуги нет, $k_{ij} = 0$;

Out – функция следования, ставит в соответствие каждой паре (d_j, q_i) неотрицательное число $k_{ji} \geq 0$, где k_{ji} – вес дуги из перехода d_j в позицию q_i , если соответствующей дуги нет, $k_{ji} = 0$;

$M_t = \{N_{it} \mid i=1, 2, \dots, n\}$ – вектор маркировки, задающий число автоматов, находящихся в момент времени t в каждом из состояний множества Q ;

$R = \{p_j(M_i(*d_j)) \mid j=1, \dots, m\}$ – вектор-функция интенсивностей переходов, определяющая среднее число срабатываний перехода d_j в течение одного такта или число таких срабатываний в единицу времени, зависящее от маркировки множества $*d_j$ – входных позиций перехода.

Позиция $q_0 \in Q$ называется внешней, имеет сколь угодно большое или единичное (если надо) значение маркера N_0 , не меняет его при переходах и может не изображаться на рисунке графа. Состояния автоматов и позиции множества $\{q_i \mid i = 1, \dots, n\}$ назовём собственными. Граф G изображает причинно-следственные связи между состояниями автоматов и интенсивности этих связей.

В отличие от канонической сети Петри множество весовых коэффициентов дуг каузальной сети – это положительные действительные числа, приписанные входным и выходным дугам j -го перехода: k_{ij} или k_{ji} соответственно. Точно так же мы будем допускать действительные числа в качестве маркеров N_i для позиций. Это позволит маркировать сеть вероятностями состояний автоматов и вообще избавиться от целых чисел. В таких случаях будем считать популяцию счётным множеством.

2. Каузальная модель

К-сеть является статической моделью популяции автоматов, она задаёт только причинно-следственные связи между элементами системы автоматов. Динамическая модель популяции – *К-модель* – определяется правилами функционирования К-сети. Функционирование К-сети подобно несущей сети Петри с учётом интенсивностей переходов, а именно: переход d_j срабатывает тогда и только тогда, когда маркировка его входа такова, что $M(*d_j) \geq In(d_j)$. Каждый переход К-сети описывает множество допустимых изменений состояний автоматов, заданное его интенсивностью.

Компьютерное описание каузальной модели содержит: 1) статическую часть – маркировку M_0 в начальный момент времени $t = 0$ и 2) динамическую часть – описание переходов. Каждый переход d_j описывается пятью выражениями:

- 1) перечисление множества $*d_j$ с коэффициентами k_{ij} ,
- 2) перечисление множества d_j^* с коэффициентами k_{ji} ,
- 3) интенсивность $p_j(M_i(*d_j))$ перехода,
- 4) тип перехода,
- 5) задержки s состояний (в качестве действующего или изменяемого состояния берется состояние автомата в момент времени $t - s$).

В общем случае описание перехода – это выражение вида $*d_j > d_j^* : p_j(M_i(*d_j)) : \text{тип перехода, задержки}$. Тип перехода зависит от зоны действия и расположения автоматов в системе. *Линейный* переход соответствует дальнodelействию в системе. Нелинейные переходы: *раствор* – равномерному распределению автоматов по всей системе (как медведи в тайге) и *смесь* – собранию взаимодействующих автоматов в одном месте (как птичий базар). Внешнее состояние в К-модели изображается звёздочкой «*».

3. Имитация поведения сложной системы

Для имитации поведения сложной системы разработана программа «Популяция», которая в каждый момент времени реализует срабатывание всех переходов. Пусть N – количество автоматов, n – число состояний, в которых может находиться каждый из автоматов. При этом каждый конкретный автомат не обязательно имеет все n состояний. В каждом i -м состоянии пребывает N_i автоматов, так что $N = N_1 + N_2 + \dots + N_n$ (n – натуральное, N_i – неотрицательное действительное при $i = 1, \dots, n$). Продемонстрируем процесс функционирования на примере простых популяций, где каждый переход мож-

но описать предложением: состояние A переводит состояние B в состояние C с интенсивностью K . В каждом такте, т. е. через заданный промежуток времени, количество автоматов в j -м состоянии изменяется или остается тем же. Некоторое состояние i влияет на состояние j и переводит его в состояние k с интенсивностью $K(i, j, k)$. Множество всех таких интенсивностей – это трехмерный массив

$$P = \{K(i, j, k) \mid i = 1..n, j = 1..n, k = 1..n\}.$$

Это означает, что N_i автоматов, находящихся в состоянии i , влияют на N_j автоматов, находящихся в состоянии j , и переводит некоторое их количество M_{ijk} в состояние k .

При линейном взаимодействии $M_{ijk} = K(i, j, k) \cdot \min(N_i, N_j)$;

при взаимодействии в растворе при $i \neq j$: $M_{ijk} = K(i, j, k) \left(\frac{N_i N_j}{N} \right)$;

при взаимодействии в растворе при $i = j$: $M_{ijk} = K(i, j, k) \left(\frac{N_i N_j}{2N} \right)$;

при нелинейном взаимодействии в смеси: $M_{ijk} = K(i, j, k) \left(\frac{N_i N_j}{N_i + N_j} \right)$,

где $j = 1, \dots, n$, т. е. одно i -е состояние может воздействовать на множество j -х. Соотно-

шения $\left(\frac{N_i N_j}{N} \right)$, $\left(\frac{N_i N_j}{2N} \right)$ и $\left(\frac{N_i N_j}{N_i + N_j} \right)$ задают вероятность встречи автоматов в i -м

и j -м состояниях в единичном объёме.

Итак, изменение количества N_{it} автоматов в такте t имеет вид:

$$N_i(t+1) = N_{it} + \Delta N_{it}$$

$$\Delta N_i = V_i - I_i + R_i.$$

V_i – число автоматов перешедших в i -е состояние в такте t :

$$V_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \min(N_j, N_k) \cdot K(j, k, i) \text{ – для линейного перехода;}$$

$$V_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\frac{N_j \cdot N_k}{N} \right) \cdot K(j, k, i) \text{ – для перехода в растворе при } k \neq j.$$

$$V_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\frac{N_j \cdot N_k}{2N} \right) \cdot K(j, k, i) \text{ – для перехода в растворе при } k = j.$$

$$V_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\frac{N_j \cdot N_k}{N_i + N_j} \right) \cdot K(j, k, i) \text{ – для перехода в смеси.}$$

I_i – число автоматов покинувших i -тое состояние в такте t :

$$I_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^n \min(N_i, \min(N_j, N_k) \cdot K(j, i, k)) \text{ – для линейного перехода;}$$

$$I_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^n \min \left\{ N_i, \left(\frac{N_j \cdot N_k}{N} \right) \cdot K(j, i, k) \right\} \text{ – для перехода в растворе при } i \neq j.$$

$$I_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^n \min \left\{ N_i, \left(\frac{N_j \cdot N_k}{2N} \right) \cdot K(j, i, k) \right\} \text{ – для перехода в растворе при } i = j.$$

$$I_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^n \min \left(N_i, \left(\frac{N_j \cdot N_i}{N_i + N_j} \right) \cdot K(j, i, k) \right) - \text{для перехода в смеси.}$$

$$R_i = \sum_{j=1}^n N_j \cdot K(j, *, i) - \text{число автоматов, «родившихся» в } i\text{-м состоянии.}$$

Чтобы получить среднее количество автоматов в каждом состоянии на $(t+1)$ -м шаге, необходимо воспользоваться этими формулами t раз.

Несмотря на ограниченность данного подхода, класс моделируемых популяций включает множество интересных систем, допускающих множество интерпретаций в различных предметных областях. Имея программу «Популяция», достаточно описать поведение отдельных элементов исследуемой системы в их связи с другими элементами и получается модель, которая легко модифицируется и быстро даёт наглядные результаты. При этом будет представлено и поведение популяции в переходном режиме. А это уже немало в тех предметных областях, где господствуют качественные рассуждения. Особенно это касается гуманитарных наук.

Литература

1. **Воробьёв В. А., Кочнев А. И.** Популяционное моделирование коллективного поведения автоматов. // Вестник Томского государственного университета. Приложение. 2007. №18, август. Материалы международных, всероссийских и региональных научных конференций, симпозиумов и школ, проводимых в ТГУ.
2. **Березовская Ю. В., Воробьёв В. А.** Популяционное моделирование населения Земли // Международная научная конференция по исторической демографии и исторической географии «Территория и население стран и континентов: история и современность». Сыктывкар, 2011.
3. **Воробьев В. А., Дербина Ю. В., Кочнев А. Ю.** Популяция автоматов – модель параллельной программы // Материалы VI Международного научно-практического семинара "Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах". СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. С. 104–109.

**НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АДЕКВАТНОСТИ СИСТЕМ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ****В. Д. Боев (Санкт-Петербург)**

При имитационном моделировании (ИМ) дискретных процессов в современной практике в качестве инструментального средства получила широкое распространение система общецелевого назначения GPSS World, являющаяся последним в данное время представителем семейства языков моделирования GPSS. Идеи, заложенные создателем GPSS Джефффри Гордоном, использовались во многих последующих специализированных языках и средах ИМ.

В течение полувека, подвергаясь непрерывной эволюции, язык GPSS находил и находит применение в новых типах компьютеров и операционных систем.

В последние годы наряду с ней применяется отечественная система моделирования AnyLogic (новая версия 6). Система AnyLogic разработана компанией XJTechnologies на основе современных концепций в области информационных технологий и результатов исследований в теории гибридных систем и объектно-ориентированного моделирования. AnyLogic – комплексный инструмент, охватывающий основные направления моделирования: дискретно-событийное, системной динамики, агентное.

Необходимым условием для оценки возможностей новой системы моделирования является её способность воспроизводить модели одинаковых процессов с не меньшей эффективностью, чем это сделано с помощью других систем, в данном случае GPSS World. Если эффективность (точность и достоверность) получаемых результатов GPSS World подтверждена многолетней практикой использования при проектировании, создании и эксплуатации сложных систем, то система AnyLogic пока не имеет такой многолетней практики. Поэтому сопоставление её с GPSS World с точки зрения сравнения результатов моделирования является весьма актуальным. Кроме того, в такой прямой постановке автором работ не обнаружено. Известна лишь статья [1], в которой «дискриминационный анализ систем имитационного моделирования», в том числе GPSS World и AnyLogic, посвящён очевидным характеристикам, благодаря которым преимущества, конечно, на стороне AnyLogic.

Математическая модель, являясь абстрактным образом моделируемого объекта или процесса, не может быть его полным аналогом. Достаточно сходства в тех элементах, которые определяют цель исследования. Для качественной оценки сходства вводится понятие адекватности модели объекту или процессу.

Данная статья является вариантом обобщения исследований, в ходе которых не ставилась задача дать всестороннюю оценку достоинствам и недостаткам обеих систем. Подготовленный читатель может, исходя из стоящих перед ним целей моделирования, сформулировать оценки такого плана. Основное внимание сосредоточено на сравнительной оценке результатов моделирования, полученных на моделях одной и той же системы. При одинаковых с требуемой точностью результатах моделирования автор счёл возможным назвать такие системы адекватными. Поэтому слово «адекватность» и включено в название статьи. Адекватность достигалась также стремлением к идентичной реализации всех функций моделируемой системы при построении моделей средствами GPSS World и AnyLogic.

При исследовании с целью получения более достоверных результатов рассматривается моделирование процессов в разнородных системах, но с использованием дискретно-событийного подхода. Всего было разработано более двадцати моделей. Сравнительные оценки результатов моделирования некоторых из них ранее были даны в [2,

3]. В настоящей статье такие оценки приводятся для других четырёх моделей (из-за ограниченности объёма статьи):

- Модель изготовления в цехе деталей.
- Модель функционирования предприятия.
- Модель предоставления ремонтных услуг.
- Модель функционирования сети связи.

Модель изготовления в цехе деталей позволяет исследовать влияние качества выполнения операций на количество и относительную долю готовых и забракованных деталей. Из табл. 1 видно, что разница в определении доли готовых деталей $\Delta_1 = 0,003$.

Таблица 1

Показатели функционирования цеха

Показатели	Системы моделирования							
	GPSS World				AnyLogic			
	Начальные числа генераторов случайных чисел							
	23	731	9722	72685	23	731	9722	72685
Время работы цеха 8 ч (480 мин)								
готДетали	9,885	9,909	9,884	9,905	9,882	9,967	9,906	9,927
доляГотДет	0,721	0,721	0,721	0,722	0,723	0,724	0,723	0,722
бракДетали	3,821	3,833	3,823	3,821	3,778	3,795	3,803	3,813
доляБрДет	0,279	0,279	0,279	0,278	0,277	0,276	0,277	0,278
срВрПодгДет	48,559	48,440	48,563	48,460	48,573	48,157	48,457	48,352
Δ доляГотДет	Δ ₁ = 0,721 – 0,724 = 0,003							
Δ срВрПодгДет	Δ ₂ = 48,563 – 48,157 = 0,406							

Модель функционирования предприятия позволяет исследовать влияние качества поступающих блоков (сборочных единиц) на увеличение стоимости изделий. Разница в определении коэффициента увеличения стоимости собираемых из блоков изделий составляет $\Delta_3 = 0,004$ (табл. 2).

Таблица 2

Показатели функционирования предприятия

Показатели	Системы моделирования							
	GPSS World				AnyLogic			
	Начальные числа генераторов случайных чисел							
	27	339	7456	82874	27	339	7456	82874
Время работы 40 ч (2400 ед. модельного времени)								
Количество готовых изделий	121,884	122,140	121,439	122,242	122,068	122,337	121,288	121,867
	$\Delta_1 = 0,803$							
Стоимость готовых изделий	74569	74743	74332	74798	74946	75,151	74487	74831
Минимальная стоимость изделий	70936	71085	70677	71144	71043	71200	70589	70926

Окончание табл. 2

Показатели	Системы моделирования							
	GPSS World				AnyLogic			
	Начальные числа генераторов случайных чисел							
	27	339	7456	82874	27	339	7456	82874
	$\Delta_2 = 611$							
Стоимость забракованных блоков	3106	3099	3091	3099	3080	3122	3067	3086
Коэффициент увеличения стоимости изделий	1,095	1,095	1,095	1,095	1,098	1,099	1,099	1,099
	$\Delta_3 = 0,004$							
Время изготовления изделия, мин	19,691	19,650	19,763	19,633	19,661	19,618	19,787	19,694
Коэффициент использования ПК1	0,316	0,316	0,315	0,316	0,318	0,316	0,313	0,315
Коэффициент использования ПК2	0,727	0,731	0,726	0,728	0,724	0,728	0,731	0,730
Коэффициент использования ПК3	0,703	0,700	0,700	0,705	0,697	0,699	0,699	0,701
Коэффициент использования ПК4	0,470	0,473	0,472	0,471	0,473	0,474	0,470	0,471
Коэффициент использования ПС	0,584	0,583	0,578	0,583	0,581	0,586	0,578	0,584
Коэффициент использования СВК	0,543	0,547	0,544	0,548	0,543	0,548	0,543	0,545
Коэффициент использования ПП	0,535	0,540	0,538	0,542	0,540	0,539	0,537	0,538

Примечание: ПК1...ПК4 – пункты контроля блоков 1...4 соответственно; ПС – пункты сборки изделий; СВК – стенды выходного контроля изделий; ПП – пункт приёмки изделий.

Модель предоставления ремонтных услуг построена с целью определения состава, загрузки подразделений фирмы и вероятности выполнения заявок на ремонт в зависимости от интенсивности их поступления и времени выполнения. Из табл. 3 следует, что разница в определении вероятности выполнения всех заявок составляет $\Delta_5 = 0,001 \dots 0,002$.

Таблица 3

Показатели фирмы предоставления ремонтных услуг

Показатели	Системы моделирования			
	GPSS World		AnyLogic	
	Начальные числа генераторов случайных чисел			
	892	6547	892	6547
Среднее время поступления заявок 20 мин				
Выполнено заявок типа 1	37,356	37,879	37,333	37,428
$\Delta_1 = 0,023...0,451$				
Выполнено ремонтов: вида 11	18,664	19,021	18,488	18,705
вида 12	9,277	9,461	9,423	9,354
вида 13	9,415	9,397	9,462	9,369
Выполнено заявок типа 2	56,633	56,297	56,641	56,330
$\Delta_2 = 0,008...0,033$				
Выполнено ремонтов: вида 21	28,273	28,195	28,115	28,378
вида 22	14,118	13,900	14,264	13,914
вида 23	13,942	14,202	14,262	14,038
Выполнено заявок типа 3	47,305	47,075	47,050	46,946
$\Delta_3 = 0,129...0,255$				
Выполнено ремонтов: вида 31	23,808	23,570	23,469	23,414
вида 32	11,851	11,831	11,792	11,788
вида 33	11,646	11,674	11,789	11,744
Выполнено заявок типа 4	47,160	46,857	47,099	47,486
$\Delta_4 = 0,242...0,326$				
Выполнено ремонтов: вида 41	23,504	23,443	23,852	23,552
вида 42	11,962	11,811	11,702	12,050
вида 43	11,694	11,603	11,545	11,884
Вероятность выполнения всех заявок	0,651	0,654	0,653	0,655
$\Delta_5 = 0,001...0,002$				
Коэффициенты использования:				
мастеров 1	0,829	0,832	0,834	0,838
мастеров 2	0,859	0,865	0,868	0,868
мастеров 3	0,655	0,659	0,669	0,668
мастеров 4	0,633	0,637	0,655	0,662
$\Delta_6 = 0,005...0,025$				
Коэффициент использования диспетчеров	1,000	1,000	1,000	1,000

Модель функционирования сети связи предназначена для определения коэффициента пропускной способности сети и среднего времени передачи одного сообщения в зависимости от интенсивности поступления сообщений и характеристик сети. Разница в определении коэффициента пропускной способности сети составляет $\Delta_1 = 0,00025$ (табл. 4).

Таблица 4

Показатели функционирования сети связи

Показатели	Системы моделирования							
	GPSS World				AnyLogic			
	Начальные числа генераторов случайных чисел							
	639747	137698	469383	547821	27498	113837	937256	8629543
Время функционирования 1 ч (3600 с)								
Коэффициент пропускной способности сети связи	0,815	0,816	0,816	0,816	0,816	0,815	0,815	0,816
	$\Delta_1= 0,81575-0,8155 =0,00025$							
Среднее время передачи одного сообщения	6,129	6,129	6,128	6,129	6,045	6,063	6,051	6,061
	$\Delta_2= 6,12875-6,045 =0,08375$							
Коэффициент загрузки вычислительного комплекса 1	0,255	0,255	0,255	0,255	0,255	0,256	0,255	0,255
Коэффициент загрузки вычислительного комплекса 2	0,170	0,170	0,170	0,170	0,169	0,17	0,17	0,170
Средний коэффициент загрузки основных каналов	0,0425	0,0425	0,0425	0,0423	0,0423	0,0423	0,0422	0,0426
Среднее количество отправленных сообщений	600,112	599,622	600,251	599,647	599,925	599,077	599,754	600,384
Среднее количество полученных сообщений	489,203	489,277	489,732	489,062	489,455	488,545	489,061	489,973

Вывод. Показатели функционирования цеха, предприятия, сети связи, фирмы предоставления ремонтных услуг, полученные в GPSS World и AnyLogic, отличаются несущественно. Это позволяет сделать вывод об адекватности GPSS World и AnyLogic относительно результатов моделирования дискретно-событийных процессов.

Литература

1. Скаткова Н. А., Воронин Д. Ю., Ткаченко К. С. Дискриминационный анализ систем имитационного моделирования с использованием версионно-модельной избыточности // Радиозлектронные компьютерные системы. 2010. № 7 (48).
2. Боев В. Д. Об адекватности систем имитационного моделирования GPSS World и AnyLogic. Часть 1 // Прикладная информатика. 2010. № 6 (30). С. 69–82.
3. Боев В. Д. Об адекватности систем имитационного моделирования GPSS World и AnyLogic. Часть 2 // Прикладная информатика. 2011. № 4 (34). С. 20–30.
4. Боев В. Д., Сыпченко Р. П. Компьютерное моделирование: Курс лекций. ИНТУИТ, 2010.
5. Боев В. Д., Кирик Д. И., Сыпченко Р. П. Компьютерное моделирование: Пособие по курсовому и дипломному проектированию. www.xjtek.ru, 2011.
6. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: Учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2004.
7. Девятков В. В. Мир имитационного моделирования: взгляд из России // Прикладная информатика. 2011. № 4 (34). С. 9–29.
8. Экс Джей Текнолоджис www.xjtek.ru.

**ЗАДАЧИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОЦЕНИВАНИИ
РЕАКЦИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ВНЕШНИЕ
ВОЗДЕЙСТВИЯ****Д. Н. Верзилин, С. Н. Потапычев, Н. А. Рыжков (Санкт-Петербург)**

Общие подходы и принципы концептуального моделирования причинно-следственных связей между событиями в социально-экономической системе. Текущее состояние социально-экономической системы описывается набором факторов, которые естественно назвать внутренними, или эндогенными факторами. В свою очередь, на процессы наступления событий в системе оказывают влияние факторы макросреды, т.е. внешние, или экзогенные факторы. Факторы могут быть количественными, обладающими некоторыми числовыми значениями, или качественными, характеризующимися одним из нескольких возможных признаков. При моделировании процессов наступления событий в системе количественные факторы описываются числовыми переменными, а качественные – категоризованными переменными. Как и факторы, переменные могут разделяться на эндогенные и экзогенные. Значения эндогенных переменных формируются внутри моделируемой социально-экономической системы. Значения экзогенных переменных определяются внешними условиями. Отнесение факторов, или переменных к эндогенным (внутренним) или экзогенным (внешним) является условным и зависит от того, как, в соответствии с целями исследования, определяются границы моделируемой системы. Некоторые экзогенные переменные соответствуют нерегулируемым факторам. Значения таких переменных определяются внешними условиями. Эти переменные выступают в качестве параметров для моделей, описывающих процедуры наступления массовых событий. Значения переменных, соответствующих регулируемым факторам, можно варьировать.

Значения эндогенных переменных с течением времени изменяются. Изменения определяются причинно-следственными связями между событиями в системе. Даже в ситуациях, при которых внешние факторы с течением времени остаются неизменными, причинно-следственные связи между событиями в системе могут обуславливать изменение эндогенных переменных и, в некоторых случаях, вызывать их неконтролируемое изменение. Целенаправленное воздействие на рассматриваемую социально-экономическую систему есть такое изменение значений регулируемых внешних факторов, которое обеспечивает благоприятную динамику состояния системы. Таким образом, цель моделирования причинно-следственных связей между событиями в социально-экономической системе состоит в описании зависимостей между факторами, позволяющими вырабатывать целенаправленное воздействие на систему.

Сетевые модели причинно-следственных связей между процессами наступления массовых событий. Концептуальная модель причинно-следственных связей между процессами наступления массовых событий должна описывать качественные зависимости между эндогенными переменными, определяющие направления их изменения. Для построения такой модели целесообразно использовать аппарат графов и сетей.

На этапе построения концептуальной модели используются априорные сведения о зависимостях между переменными, основанные на «здравом смысле», известных социально-экономических соотношениях и инвариантах. Например, рассматривается инвариант в форме соотношения, связывающего среднее количество элементов системы, находящихся в заданном состоянии, среднюю интенсивность появления этого состояния и среднее время пребывания в данном состоянии, и инвариант в форме баланса потоков событий, связывающего изменение количества элементов, находящихся в заданном состоянии, количество элементов, перешедших в данное состояние и количество элементов, сменивших данное состояние на другое.

Для построения концептуальной сетевой модели целесообразно использовать аппарат знаковых графов [2, 3]. Использование статистических данных о массовых событиях позволит осуществить коррекцию концептуальной модели и описать количественные и логико-временные зависимости между переменными.

Введем в рассмотрение граф $G=(X,A,Q)$, где X – множество вершин графа, A – множество дуг графа, Q – разметка на множестве дуг. Каждая дуга графа представляет собой пару вершин: $a \in A, a = (x, y), x, y \in X$. Разметка Q приписывает каждой дуге $a \in A$ знак «+» или «-»: $q(a) = +$ или $q(a) = -$.

Далее, каждой вершине графа соответствует эндогенная переменная. Для переменных и вершин будем использовать одинаковые обозначения.

Если увеличение (уменьшение) переменной $x \in X$ влечет увеличение (уменьшение) $y \in X$ и $a = (x, y)$, то $q(a) = +$.

Если увеличение (уменьшение) переменной $x \in X$ влечет уменьшение (увеличение) $y \in X$ и $a = (x, y)$, то $q(a) = -$.

Если изменение $x \in X$ не влечет изменение $y \in X$ и $a = (x, y)$, то $a \notin A$.

Исследование построенной сетевой концептуальной модели позволяет выявить ситуации, при которых первоначальное незначительное увеличение (уменьшение) значения одной эндогенной переменной, вызванное изменением экзогенной переменной, приводит к неконтролируемому увеличению (уменьшению) значений эндогенных переменных, расположенных вдоль «положительного» цикла графа.

Цикл (замкнутый путь) графа G считается положительным, если положительно произведение знаков составляющих его дуг. Для отрицательного цикла гарантируется уменьшение (увеличение) значения переменной, которая первоначально была увеличена (уменьшена). В этой ситуации возможны колебательные процессы (на практике обычно затухающие) изменения значений переменных.

Как будет видно из дальнейшего изложения, предложенные сетевые концептуальные модели причинно-следственных связей между процессами наступления событий в системе интегрируются с динамическими и регрессионными моделями, разрабатываемыми на основе статистических данных о массовых событиях, и имитационными моделями, описывающими поведение элементов системы.

Приведенные понятия, характеризующие процессы наступления событий в социально-экономической системе, предложенные сетевые модели, представляющие причинно-следственные связи между событиями, позволяют сформулировать следующие основные принципы концептуального моделирования.

1. Принцип ограниченности рассматриваемой социально-экономической системы. Необходимо ограничиться рассмотрением событий, источником которых являются элементы заданной социально-экономической системы.

2. Принцип разделения факторов. Следует различать внешние регулируемые, внешние нерегулируемые и внутренние факторы наступления событий.

3. Принцип априорного определения направления причинно-следственных связей между событиями. Необходимо определить знаки взаимного влияния эндогенных переменных.

Особенности применения имитационного моделирования при описании поведения элементов социально-экономической системы. Охарактеризуем совокупность знаний для оценивания реакции социально-экономических систем на внешние воздействия.

1. Теоретические экономические построения и уточняющие их эконометрические модели, описывающие взаимосвязи между рассмотренными выше эндогенными и экзогенными переменными.

2. Статистические данные о состоянии элементов социально-экономической системы и внешних воздействиях, позволяющие определить значения эндогенных и экзогенных переменных. Например, значение некоторой эндогенной переменной может определяться количеством элементов заданного типа, находящихся в заданном состоянии.

3. Модели процессов изменения состояния элементов системы. Модели могут быть использованы для преодоления фрагментарности статистических данных. В случае если вероятность перехода элемента системы в заданное состояние зависит от текущего состояния других элементов, то такие модели приобретают вид классических имитационных моделей.

Построение комплекса моделей для оценивания на основе фрагментарных данных реакции социально-экономической системы на внешние воздействия. Считаем, что источником событий в системе являются ее элементы, наблюдаемые в дискретные моменты времени. В соответствии с введенными ранее терминами совокупность состояний элементов определяет значения эндогенных и экзогенных переменных. В результате наблюдения за элементами формируется трехмерная таблица статистических данных (элементы таблицы имеют три индекса):

$$v_i^{pt}, \quad w_j^{pt}; \quad i = 1, \dots, N; \quad j = 1, \dots, M; \quad p = 1, \dots, P; \quad t = 1, \dots, T,$$

где символ v использован для обозначения эндогенных переменных, символ w – для обозначения экзогенных переменных, i, j – номера переменных, p – номер объекта, t – номер момента времени.

Таким образом, имеются так называемые «панельные» данные, т.е. значения переменных фиксируются для различных элементов в различные моменты времени.

Данные могут быть фрагментарными (трехмерная таблица может содержать пропуски).

Сами переменные, а не их значения, будем обозначать: $v_i(t), \quad w_j(t); \quad i = 1, \dots, N; \quad j = 1, \dots, M$, в зависимости от рассматриваемого момента времени t .

Регрессионные модели описывают статистически значимые зависимости между переменными. Построению регрессионных моделей предшествует определение тождеств и априорных моделей [1].

Тождества определяют однозначные функциональные зависимости между переменными. Тождества формируются на основе балансов потоков событий, инвариантов систем массового обслуживания и т.п. Тождества позволяют однозначно выразить значения некоторых эндогенных переменных через значения других переменных. Будем считать, что такие переменные уже исключены из рассмотрения, и оставшиеся переменные не связаны функциональными зависимостями.

Используем понятие предопределенной переменной. Значения предопределенных переменных могут влиять на формирование значений эндогенных переменных в заданный момент времени. Предопределенная переменная представляет собой либо экзогенную переменную $w_j(\tau); \quad j = 1, \dots, M$, в этом случае $\tau \leq t$, либо эндогенную переменную $v_i(\tau); \quad i = 1, \dots, N$, в этом случае $\tau \leq t$.

Совокупность априорных моделей представляет собой систему линейных одно-временных уравнений. Одновременные уравнения составляются в соответствии с теоретическими представлениями о зависимостях между переменными. Коэффициенты при переменных обычно не имеют точного числового выражения. Для них известен знак либо диапазон. В общем виде уравнения записываются так:

$$\begin{aligned} c_{11}v_1(t) + c_{12}v_2(t) + \dots + c_{1n}v_n(t) + a_{10} + a_{11}z_1 + a_{12}z_2 + \dots + a_{1k}z_k &= \delta_1 \\ c_{21}v_1(t) + c_{22}v_2(t) + \dots + c_{2n}v_n(t) + a_{20} + a_{21}z_1 + a_{22}z_2 + \dots + a_{2k}z_k &= \delta_2 \\ &\vdots \\ c_{n1}v_1(t) + c_{n2}v_2(t) + \dots + c_{nn}v_n(t) + a_{n0} + a_{n1}z_1 + a_{n2}z_2 + \dots + a_{nk}z_k &= \delta_n \end{aligned}$$

Здесь $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ – переменные-невязки, $x_1, x_2, \dots, x_k$ – предопределенные переменные. Предполагается, что число уравнений совпадает с числом эндогенных переменных. Как правило, про многие коэффициенты при переменных можно однозначно сказать, что они равны 0.

Именно априорное представление о том, какие коэффициенты равны 0, облегчает составление регрессионных моделей и идентификацию их коэффициентов. В предположении, что коэффициенты при эндогенных переменных образуют неособенную матрицу, выражаем значения эндогенных переменных через значения предопределенных переменных:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= b_{10} + b_{11} x_1 + b_{12} x_{21} + \dots + b_{1k} x_k + \xi_1 \\ v_2(t) &= b_{20} + b_{21} x_1 + b_{22} x_{21} + \dots + b_{2k} x_k + \xi_2 \\ &\vdots \\ v_n(t) &= b_{n0} + b_{n1} x_1 + b_{n2} x_{21} + \dots + b_{nk} x_k + \xi_n \end{aligned}$$

По-прежнему про многие коэффициенты известно, что они равны 0 (матрица разрежена).

Записанные таким образом уравнения подлежат идентификации на основе стандартных процедур регрессионного анализа.

Если для какой-нибудь эндогенной переменной не удастся установить статистически значимую регрессионную модель, то такая переменная исключается из рассмотрения. При этом из правых частей уравнения исключаются соответствующие предопределенные переменные. В случае высоких корреляций между предопределенными переменными в правой части одного из уравнений количество переменных с ненулевыми коэффициентами может быть сокращено.

Регрессионные модели естественным образом интегрируются с определенными ранее сетевыми концептуальными моделями причинно-следственных связей между процессами наступления массовых событий.

Рассмотрим уравнение, в правой части которого присутствует с ненулевым коэффициентом эндогенная предопределенная переменная. Допустим, это уравнение с номером i :

$$v_i(t) = e_{ij} + d_{ij} v_j(t), \text{ где } e_{ij} - \text{сумма всех остальных слагаемых уравнения.}$$

В других обозначениях запишем:

$$v_l(\tau + t_{ij}) = s_{ij} + d_{ij} v_l(\tau)_{\square}$$

Предполагаем, что v_i не зависит от $v_j(t)$. Такое предположение оправданно, поскольку сильные корреляции между переменными правых частей и между переменными и остатками исключены.

Таким образом, изменение v_j в момент времени t_j влечет пропорциональное изменение v_i спустя t_{ij} единиц времени:

$$\Delta v_f(\tau + t_{ff}) = d_{ff} \Delta v_f(\tau) \square$$

Если считать, что коэффициенты регрессий не претерпевают существенных изменений в течение небольших промежутков времени, то d_{ij} не зависит от t .

Теперь введенную ранее концептуальную сетевую модель можно дополнить следующими данными. Каждой вершине, соответствующей эндогенной переменной, сопоставляются коэффициенты при экзогенных переменных и свободный член из уравнения регрессии. В этом списке отсутствуют коэффициенты при эндогенных предопределенных переменных. Вместо коэффициента вводится дуга, соединяющая переменные v_j и v_i . Эта дуга помечена двумя числами: d_{ij} и t_{ij} , при этом d_{ij} – коэффициент передачи изменений, а t_{ij} – временная задержка. Таким образом, построенная модель описывает динамику состояния системы.

Предложенный подход к анализу циклических изменений значений эндогенных переменных эффективен в случае, если продолжительность циклов существенно превышает шаг наблюдений. Если это условие не выполнено, то отрицательные циклы могут никак себя не проявить, а для положительных циклов будет замечен синхронный рост образующих цикл переменных. В последнем случае между переменными будет наблюдаться корреляционная зависимость (цикл может быть заменен одной переменной с меткой). В случае необходимости исследования «быстрых» циклов шаг наблюдения должен быть уменьшен.

Определение наиболее информативных показателей, описывающих управляющие воздействия и реакцию системы. Выше описаны процедуры формирования моделей для оценивания реакции социально-экономической системы на внешнее воздействие. Совокупность эндогенных и экзогенных переменных в составе предложенных моделей по своему назначению и условиям отбора может быть использована в качестве системы информативных показателей. Сформулируем основные шаги отбора переменных, определяющие алгоритм формирования информативных показателей. Отбираем переменные, входящие в состав одновременных уравнений. Отбираем переменные, для которых идентифицированы регрессионные зависимости. Сокращаем список переменных, устраняя сильные корреляционные зависимости между предопределенными переменными. Используем стандартные процедуры анализа главных компонентов и факторного анализа (вводим новые переменные, ортогональные друг другу).

Выводы

Аппарат знаковых графов может быть использован для описания структуры зависимостей между эндогенными переменными, определяющими состояние социально-экономической системы. Анализ зависимостей между эндогенными переменными позволяет прогнозировать циклические и неконтролируемые изменения состояния системы. Зависимости между эндогенными переменными и зависимости эндогенных переменных от экзогенных переменных могут быть определены на основе регрессионного и факторного анализа фрагментарных данных о массовых событиях в системе.

В контексте рассмотренной ситуации задачи имитационного моделирования заключаются в восполнении отсутствующих статистических данных о состоянии элементов социально-экономической системы (преодолении фрагментарности данных).

Состав и последовательность имитационных экспериментов определяются сетевыми моделями в форме знаковых графов (используются уточняющие значения заданных переменных).

Литература

1. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: ЮНИТИ, 2001. Т. 2: Айвазян С.А. Основы эконометрики.
2. Плотинский Ю. М. Модели социальных процессов. М.: Логос, 2001. 296 с.
3. Huff A. S. Mapping strategic thought. Chichester: Wiley, 1990. P. 11–49.

**МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ НА
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ УСТРОЙСТВ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРИЕМА
СИГНАЛОВ В ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ****Д. И. Верхушин (Санкт-Петербург)**

Цель доклада состоит в презентации и обсуждении одного из этапов совершенствования методики имитационного моделирования и статистических испытаний, которая характеризуется прежде всего тем, что позволяет гарантировать репрезентативность их результатов в условиях, когда испытания проводятся при отсутствии достаточно плотных по точности теоретических оценок характеристик помехоустойчивости.

Характеристики помехоустойчивости устройств формирования и приема сигналов в системах цифровой связи, отличающихся реализацией в них современных сигнально-кодовых конструкций (СКК), турбоподобных кодов при итеративных методах декодирования, принято анализировать с помощью универсальной качественной метрики – зависимости вероятности появления ошибочного бита P_b от отношения энергии бита к односторонней спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 . Необходимость все более детального учета характеристик непрерывных каналов связи и присутствующих в них мешающих воздействий приводит к существенному усложнению процедур формирования и приема сигналов.

В этих условиях получение достаточно точных математических соотношений, характеризующих зависимость P_b от E_b/N_0 в реализуемых современных алгоритмах формирования и приема сигналов, становится весьма проблематичным и практически невыполнимым. Известные же аддитивные границы для вероятности ошибок и асимптотические оценки не всегда отличаются необходимой плотностью по точности, особенно при малых значениях отношения сигнал/шум (E_b/N_0), достигаемых при практическом применении современных СКК, турбоподобных кодов и процедур итеративного декодирования [1, 2].

По этим причинам все более необходимым и оправданным становится применение и совершенствование методики имитационного моделирования современных устройств формирования и приема сигналов, одной из основных целей и завершением которых являются, как правило, их статистические испытания на помехоустойчивость, представляемые в виде таблиц или графиков зависимости P_b от E_b/N_0 . В свою очередь, одной из основных целей совершенствования методик имитационного моделирования и статистических испытаний на их основе становится достижение репрезентативности (статистической устойчивости, повторяемости при каждой презентации) результатов имитационного моделирования и статистических испытаний.

Степень репрезентативности удобно характеризовать достигаемыми при испытаниях значениями доверительной вероятности и доверительного интервала при интервальных оценках характеристик помехоустойчивости. Для определения необходимого размера выборки при статистических исследованиях в число исходных условий входит не только заданное значение доверительного интервала, но и ожидаемая вероятность ошибок на бит или символ. Тогда необходимый размер выборки определяется соотношением [3, 4]:

$$N = \text{ceil} \left[\left(\frac{qnorm\left(\frac{1-P_{dv}}{2}, 0, 1\right)}{\varepsilon} \right)^2 \cdot \frac{1-P_{bt}}{P_{bt}} \right], \quad (1)$$

где P_{dv} – заданное значение доверительной вероятности (обычно не ниже 0,95); ε – заданное значение нормированного (относительно P_b) доверительного полуинтервала (обычно 0,1 и менее, что соответствует оценке ожидаемой вероятности ошибок с погрешностью не более $\pm 10\%$, например, $0,9 \cdot 10^{-5} \dots 1,1 \cdot 10^{-5}$ при ожидаемом значении $P_{bt} = 1 \cdot 10^{-5}$).

Соответственно, $qnorm(p, \mu, \sigma)$ – обратная функция нормального распределения, для которой p – значение вероятности, μ – математическое ожидание, σ – среднеквадратическое отклонение; $\text{ceil}(x)$ – возвращает наименьшее целое не меньшее x .

В табл. 1 представлены рассчитанные в соответствии с (1) значения размера выборки N при ожидаемом значении $P_{bt} = 1 \cdot 10^{-5}$ для различных P_{dv} и ε .

Таблица 1

P_{bt}	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
ε	0,25	0,2	0,18	0,16	0,15	0,12	0,1	0,05
$P_{dv} = 0.75$	$2,2 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^6$	$4,1 \cdot 10^6$	$5,2 \cdot 10^6$	$5,9 \cdot 10^6$	$9,2 \cdot 10^6$	$1,33 \cdot 10^7$	$5,3 \cdot 10^7$
$P_{dv} = 0.8$	$2,7 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^6$	$5,1 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^6$	$7,3 \cdot 10^6$	$1,15 \cdot 10^7$	$1,65 \cdot 10^7$	$6,57 \cdot 10^7$
$P_{dv} = 0.9$	$4,4 \cdot 10^6$	$6,8 \cdot 10^6$	$8,4 \cdot 10^6$	$1,06 \cdot 10^7$	$1,21 \cdot 10^7$	$1,88 \cdot 10^7$	$2,71 \cdot 10^7$	$1,08 \cdot 10^8$
$P_{dv} = 0.95$	$6,2 \cdot 10^6$	$9,7 \cdot 10^6$	$1,19 \cdot 10^7$	$1,51 \cdot 10^7$	$1,71 \cdot 10^7$	$2,67 \cdot 10^7$	$3,85 \cdot 10^7$	$1,54 \cdot 10^8$
$P_{dv} = 0.97$	$7,6 \cdot 10^6$	$1,18 \cdot 10^7$	$1,46 \cdot 10^7$	$1,84 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^7$	$3,28 \cdot 10^7$	$4,71 \cdot 10^7$	$1,88 \cdot 10^8$
$P_{dv} = 0.99$	$1,07 \cdot 10^7$	$1,66 \cdot 10^7$	$2,05 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^7$	$2,95 \cdot 10^7$	$4,61 \cdot 10^7$	$6,64 \cdot 10^7$	$2,65 \cdot 10^8$

Так как в формуле (1) ожидаемая вероятность ошибки на бит или символ P_{bt} соответствует вероятности ошибки в канале с аддитивным белым гауссовским шумом, то при появлении в таком канале мешающих воздействий (замираний, помех, и т.д.) фактическая вероятность ошибки будет выше. Следовательно, требования к P_{dv} и ε будут выполняться при меньших размерах выборки, и проводить статистические испытания по всей выборке, рассчитанной по формуле (1), нет необходимости.

Основу предлагаемой методики составляют статистические испытания с адаптивным наращиванием размера выборки до достижения заданных в технических требованиях значений P_{dv} и ε . Отличительной особенностью предлагаемой методики (неизвестной ранее) является формирование промежуточных оценок достигнутого значения ε и принятие решения о продолжении либо прекращении испытаний на их основе. Это гарантирует репрезентативность результатов имитационного моделирования и статистических испытаний в условиях, когда испытания проводятся при отсутствии достаточно плотных по точности теоретических оценок P_b .

В предлагаемой методике:

1. Необходимый размер выборки разбивается на блоки (пакеты) с размером выборки в каждом пакете $N_1 \geq 2048$, например, $2^{11} \dots 2^{17}$ с наращиванием до необходимого общего размера выборки на основе повторных «прогонов» с фиксированным размером N_1 и обеспечением статистической независимости случайных последовательностей на каждой выборке в повторных обращениях к датчикам случайных последовательностей. Необходимое число N_n «прогонов» по $N_T = 2048$ канальных символов ($N_n = \text{ceil}[N/N_T]$) для N , полученных в табл. 1, приведено в табл. 2.

Таблица 2

P_{bt}	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
ε	0,25	0,2	0,18	0,16	0,15	0,12	0,1	0,05
$P_{dv} = 0.75$	1075	1661	2002	2540	2881	4493	6495	25879
$P_{dv} = 0.8$	1319	2051	2491	3174	3565	5616	8057	32081
$P_{dv} = 0.9$	2149	3321	4102	5176	5909	9180	13233	52881
$P_{dv} = 0.95$	3028	4737	5811	7374	8350	13038	18799	75049
$P_{dv} = 0.97$	3711	5762	7129	8985	10254	16016	22999	91993
$P_{dv} = 0.99$	5225	8106	10010	12696	14405	22510	32422	129590

2. По завершении первого прогона формируются предварительные оценки двух величин – вероятности ошибки $P_b^{(1)}$ и величины доверительного полуинтервала $\varepsilon^{(1)}$ при фиксированном изначально заданном значении доверительной вероятности P_{dv} , и сравнивается достигнутое значение $\varepsilon^{(1)}$ с требуемым (допустимым) значением ε .

3. Если $\varepsilon^{(1)} > \varepsilon$, то осуществляется переход ко второму и последующим «прогонам» с контролем соответствующих каждому прогону значений $P_b^{(k)}$, $\varepsilon^{(k)}$, где k – номер «прогона», до тех пор, пока не будет выполнено неравенство $\varepsilon^{(k)} \leq \varepsilon$, что и является условием завершения цикла прогонов. Величина $\varepsilon^{(k)}$ контролируется в соответствии с соотношением:

$$\varepsilon^{(k)} = qnorm\left(\frac{1-P_{dv}}{2}, 0, 1\right) \cdot \sqrt{\frac{1-P_b^{(k)}}{k \cdot N_1 \cdot P_b^{(k)}}}. \quad (2)$$

Тестирование предлагаемой методики проводилось на имитационных моделях при известных для заказчика и гарантированно неизвестных для исследователя теоретических характеристиках помехоустойчивости. Результаты представлялись в виде таблиц и графиков зависимости P_b от E_b/N_0 и сравнивались с теоретическими зависимостями. Результаты таких сопоставлений подтвердили ожидаемую плотность экспериментальных оценок зависимостей P_b от E_b/N_0 . Результаты таких сопоставлений авторы могут представить в процессе доклада. Для обсуждения планируется представить также экспериментальные оценки зависимостей $P_b(E_b/N_0)$ для моделей каналов и присутствующих в них мешающих воздействий, применительно к которым теоретические оценки зависимости $P_b(E_b/N_0)$ в настоящее время отсутствуют и получение которых скорее всего практически невозможно.

Вывод

Предлагаемая методика имитационного моделирования и статистических испытаний на помехоустойчивость, в отличие от известных, обеспечивает выполнение требований по статистической репрезентативности результатов экспериментальных исследований характеристик помехоустойчивости на основе предложенного в докладе алгоритма адаптивного наращивания размера выборки до достижения заданных в технических требованиях значений доверительной вероятности и доверительного интервала. Методика характеризуется достаточной универсальностью и возможностью ее применения, в том числе в ходе организации трассовых испытаний и обработки результатов.

Литература

1. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник/ **Коржик В. И., Финк Л. М., Щелкунов К. Н.**: Под ред. Л. М. Финка. М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
2. **Бураченко Д. Л., Савищенко Н. В.** Сигнальные конструкции. Приложения. Часть 3: Учебное пособие/ СПбГУТ. СПб, 2005.
3. **Тихонов В. И.** Статистическая радиотехника. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1982, 624 с.
4. **Крамер Г.** Математические методы статистики. М.: Мир, 1975, 648 с.

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НАУЧНО-
ИННОВАЦИОННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ****А. В. Горохов, Д. Н. Халиуллина (г. Апатиты)****Введение**

Проблема перехода на инновационный путь развития весьма актуальна для современной России. Сырьевая направленность экспорта и преобладание топливно-энергетического комплекса в структуре промышленности, позволяют, так или иначе, решать текущие народнохозяйственные задачи, однако в обозримой перспективе именно инновации позволят повысить эффективность использования природных ресурсов и производительность труда. В современных условиях растут наукоемкость выпускаемой продукции и стоимость технологических разработок, поэтому особое внимание необходимо уделять развитию научно-инновационных предприятий, поскольку практическое применение и широкое распространение результатов научно-технической и исследовательской деятельности, оформленных в виде объектов интеллектуальной собственности выступает необходимым фактором экономического развития страны [1]. В Мурманской области за истекшие 5 лет на основе научных разработок институтов Кольского научного центра РАН за счет государственно-частного партнерства создано более 30 инновационных предприятий.

Предприятие – это самостоятельный хозяйствующий субъект, созданный в порядке, установленном законодательством о предприятиях и предпринимательской деятельности для производства продукции, выполнения работ и оказания услуг в целях удовлетворения общественных потребностей и получения прибыли. Инновационное предприятие отличается тем, что более 70% объема его продукции (в денежном выражении) за отчетный налоговый период является инновационными продуктами и/или инновационной продукцией. Производство инновационной продукции сопряжено с дополнительными затратами на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, что обуславливает снижение конкурентоспособности такого предприятия на ранних фазах его развития. С другой стороны, в более поздних фазах развития – при выходе на проектную мощность, инновационное предприятие за счет применения новых технологий и выпуска новой продукции может оказаться более конкурентоспособным и приносить большую прибыль по сравнению с другими предприятиями.

Моделирование научно-инновационного предприятия

Развитие предприятия, как и любой сложной системы, не может идти только поступательно, в жизни растущей компании неизбежно возникают проблемы, противоречия, вследствие чего периоды стабильного развития сменяются кризисами, разрешение которых является, в свою очередь, базой для дальнейшего роста. Жизненный цикл предприятия представляет собой последовательность фаз развития. В пределах каждой фазы происходит накопление или исчерпание каких-либо ресурсов. Смена фаз развития происходит в виде кризисов. Кризис является экстраординарным механизмом адаптации предприятия к новым условиям и одновременно механизмом физического ее сохранения.

По мере развития предприятия его структура меняется, превращаясь из простой в разветвленную и многоуровневую. На рис. 1 изображены три основные фазы развития инновационного предприятия. В соответствии с ними разработаны три модели, первая – работает в первой фазе и останавливается в момент первого кризиса, вторая – аналогично во второй и третья – в третьей.

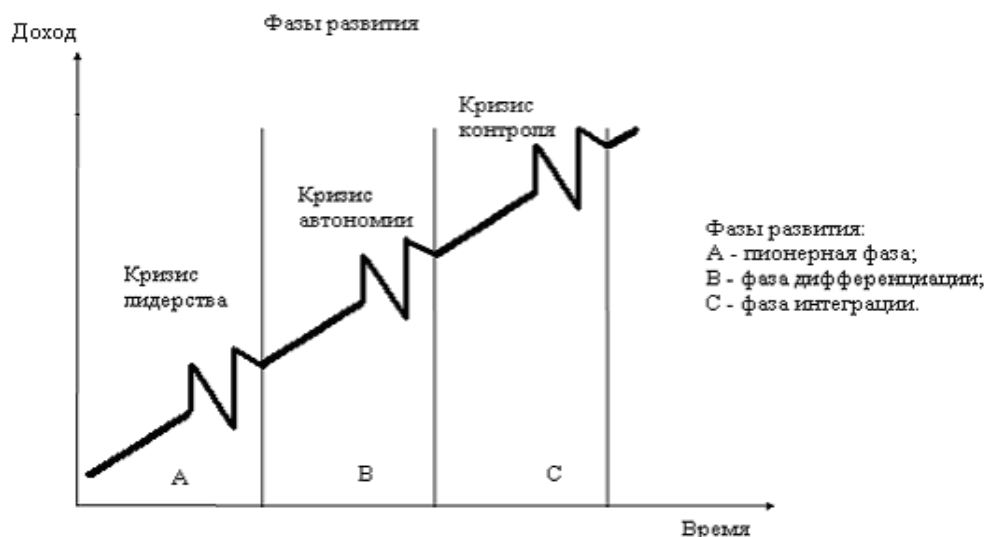


Рис. 1. Фазы развития предприятия

Каждая фаза развития предприятия по-своему уникальна и требует «особенного» к ней отношения. Так, смыслом существования организации в пионерной фазе выступает максимально полное удовлетворение требований конкретного и немногочисленного клиента. Организация приспособлена под личностные качества руководителя и зависит от тех нужд потребителей, которые предприятие намерено удовлетворить. По мере роста предприятие вступает в фазу дифференциации. Одной из главных задач становится создание и совершенствование структуры управления. В дальнейшем такое предприятие либо «исчезает», и его ресурсы будут использованы для создания других предприятий, либо оно переходит в следующую фазу – «интеграции». В фазе интеграции определяющим фактором развития становится коллектив совместно работающих людей, что позволяет обновить организацию для достижения поставленных целей. После фазы интеграции предприятие вступает в ассоциативную фазу, которая является фазой партнерства и кооперации.

Чтобы описать весь процесс развития предприятия, необходимо разработать несколько моделей, каждая из которых будет представлять поведение системы в определенной фазе развития. Развитие предприятия представляет собой последовательность фаз, в пределах которых происходит рост (количественное изменение параметров), а при переходе в следующую фазу происходят структурные изменения. Структурными изменениями являются: введение многоуровневой структуры управления; формирование новых структур (стратегическое планирование, логистика и т.д.); децентрализация управления; организация территориально распределенного производства.

Модель разработана на основе данных, предоставленных НП "Технопарк-Апатиты" (федеральный фонд содействия развитию малого бизнеса в научно-технической сфере). Основным направлением деятельности технопарка является осуществление процесса коммерциализации завершенных научных разработок [2]. При синтезе имитационной модели использована разработанная в ИИММ КНЦ РАН технология концептуальных шаблонов, обеспечивающая интеграцию коллективных экспертных знаний и построение имитационных моделей из типовых шаблонов, что существенно повышает корректность моделей и сокращает сроки их разработки [3]. Модель реализована средствами системы имитационного моделирования AnyLogic и представляет собой композицию типовых конструкций, обеспечивающую имитацию основных процессов развития предприятия: производство продукции; потребление ресурсов; фи-

нансовые потоки; управление [4]. Упрощенно модель состоит из следующих основных блоков:

- Доход (представлен балансом наличности, доходами и расходами).
- Персонал (представлен персоналом, процессами найма, распределения и увольнения).
- Производство (представлено производством, ценой изделия и процессом продаж).
- Менеджмент (представлен управлением персоналом).
- Рынок (представлен оценкой попадания в нужный сегмент рынка).

Перечисленные блоки взаимосвязаны: например, чем больше доход предприятия, тем больше средств можно вложить в разработку продукции, и соответственно, чем больше продуктов производится, тем быстрее пополняется доход предприятия. Менеджмент по-разному влияет на производство и на персонал, так как не вовремя введенная должность управленца может вызвать спад производства и увольнение персонала. А если она введена в нужный момент – это даст новый всплеск роста.

Технология поддержки принятия решений по управлению развитием научно-инновационного предприятия

На имитационной модели, задавая внешние условия и значения параметров предприятия, а также управляющие параметры, определяем пределы роста предприятия в каждой фазе его развития. Внешние условия (характеристики рынка, географическое положение) определяют в модели длительность и размер каждой фазы роста предприятия до наступления кризиса. Внутренние условия (средняя заработная плата, показатель попадания в нужный сегмент рынка, затраты на 1 изделие) определяют на модели траекторию развития предприятия внутри каждой фазы. Многократная имитация процесса развития в каждой фазе позволяет определить область принятия решения. Данная область находится между периодами роста и деградации предприятия.

Задавая внутренние условия, мы получаем различные варианты развития предприятия на первой фазе. По полученным данным определяем окончание первой фазы развития предприятия (рис. 2).

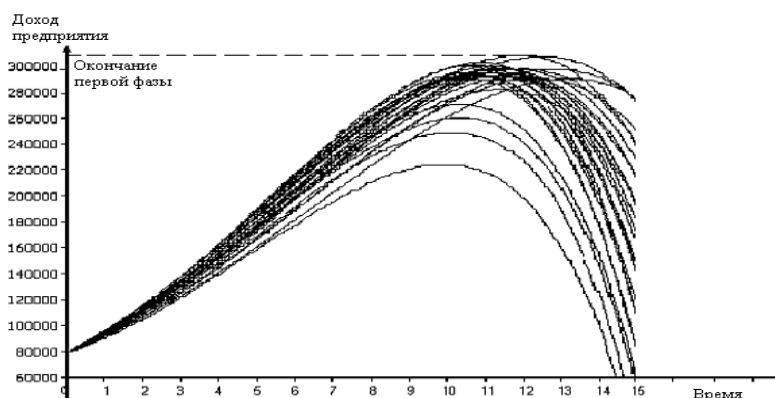


Рис. 2. Варианты развития предприятия на первой фазе

Конец первой фазы и начало второй позволяют оценить возможность дальнейшего самостоятельного развития предприятия. Пересечение этих фаз говорит о том, что при «правильном» управлении предприятие может развиваться самостоятельно, а отсутствие пересечения говорит о том, что в таких условиях предприятию требуется поддержка – инвестиции. Для инновационного предприятия характерна вторая ситуация.

Для выбора одного из вариантов развития предприятия, необходимо задать предпочтения по следующим частным критериям:

- максимальный общий доход;
- максимальный доход предприятия;
- минимальное время достижения максимального дохода.

Решив задачу свертки и максимизации, получаем один из сценариев развития предприятия, для которого показатель интегрального критерия является наилучшим.

Далее, изменяя структуру предприятия, добавляя новое звено управления, проводя многократную имитацию с шагом $\Delta t = t_2 - t_1$, получаем различные варианты перехода предприятия во вторую фазу. При этом «приемлемые» варианты развития позволяют определить начало второй фазы и выделить область принятия решения, а в ней – точку принятия решения (рис. 3).

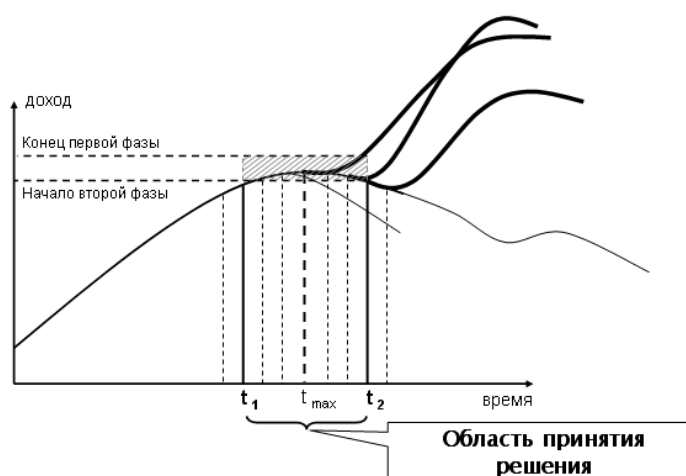


Рис. 3. Выделение области принятия решения:

————— — подходящие варианты; ————— — заведомо неподходящие варианты

От времени принятия решений в каждой фазе развития зависит то, каким образом предприятие будет развиваться дальше. Из графиков на рис. 3 видно, что не вовремя принятое решение негативно сказывается на развитии предприятия.

Следующие операции повторяются аналогично первой фазе (рис. 4), при этом технология позволяет изменять предпочтения по частным критериям ($Krit_1$, $Krit_2$), меняя значение интегрального критерия.

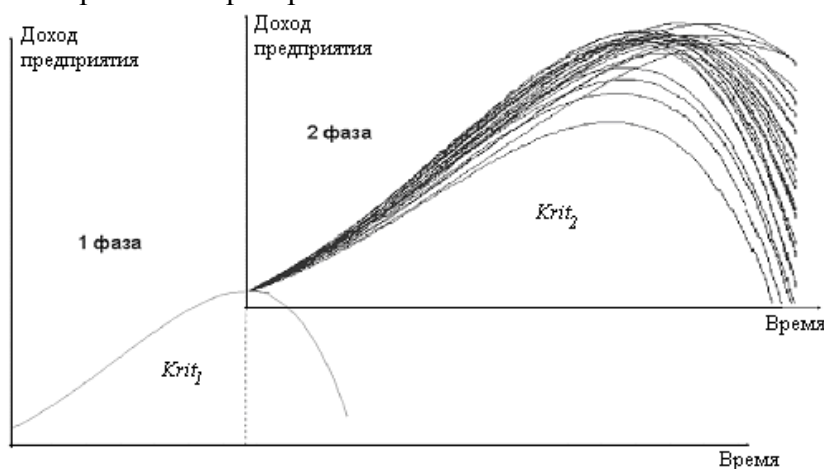


Рис. 4. Варианты развития предприятия на второй фазе

Многократная имитация позволяет выбрать момент принятия решения и получить прогноз последствий принятия или непринятия, а также несвоевременного принятия решения.

Заключение

Разработана имитационная модель научно-инновационного предприятия обеспечивающая имитацию основных процессов развития предприятия: производство продукции и потребление ресурсов; финансовые потоки и управление. Развитие предприятия представляет собой последовательность фаз, в пределах которых происходит рост (количественное изменение параметров), а при переходе в следующую фазу происходят структурные изменения.

Многократная имитация процесса развития в каждой фазе позволяет определить на траектории развития предприятия внутри фазы области роста и деградации, и, соответственно, выделить область принятия решения. Модель позволяет в ходе пошаговой имитации для любой точки внутри области принятия решения получить прогноз последствий принятия или непринятия решения в данный момент времени.

Предложенная информационная технология поддержки принятия решений по управлению развитием инновационного предприятия обеспечивает выделение критических точек развития предприятия и нахождение своевременных и обоснованных управленческих решений.

Литература

1. **Зинов В. Г.** Коммерциализация технологий и международная программа "Технологический менеджмент" // Электронный журнал "Технологический бизнес", № 1. www.techbusiness.ru/tb/archiv/number1/page04.htm
2. **Маслобоев А. В.** Модель единого информационного пространства для взаимодействия субъектов инновационной деятельности и продвижения инновационных разработок // Инновации. 2009. № 8(130). С. 98–104.
3. **Быстров В. В.** Программный комплекс автоматизации концептуального синтеза системно-динамических моделей // Программные продукты и системы. 2008. № 1. С. 32–35.
4. **Халиуллина Д. Н.** Имитационная модель малого инновационного предприятия // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии / Под ред. В.А. Путилова. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. Вып. 1. С. 67–69.

ЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД В МЕТОДОЛОГИИ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ СИСТЕМ

В. И. Гурьянов (Чебоксары)

Имитационные модели позволяют адекватно моделировать поведение сложных систем в том случае, когда они довольно точно воспроизводят объект исследования. Поэтому характерна ситуация, когда программная симуляция оказывается столь же сложным объектом, как и сам объект моделирования, что, в частности, вызывает затруднения в объяснении результатов имитационных экспериментов. Одно из решений – обратиться к формальным моделям имитирующих программ. В данной работе предлагается один из подобных подходов, основанный на темпоральной логике CTL*.

Имитационные модели активных систем. В работе [1] предложен проект профиля UML (*Scientific Profile*), предназначенного для объектного имитационного моделирования сложных систем. *Scientific Profile* представляет собой формальный язык, наделенный двойственной семантикой – предметной и вычислительной. Код имитирующей программы рассматривается как текст, описывающий предметную область. Прагматика задается стереотипом *Research Use Case Model*, семантика – *Research Analysis Model*, а синтактика – *Research Design Model*. Важным качеством профиля является то, что имитационные модели, сформулированные на *Scientific Profile*, не зависят от платформы, на которой проводятся вычислительные эксперименты. Далее рассматриваются имитационные модели активных (организационных) систем, заданные на этом языке.

На рис. 1. представлена диаграмма классов, определяющая объектные модели активных систем, и пример классов для одной из конкретных моделей активных систем. Абстрактный класс Subject фиксирует определяющие качества активных систем (активность, управление, целенаправленность) и имеет метод `exist <<Exist>>` (он определяет единицу дискретно-событийного времени), свойства `product {Concept = Продукт}`, `materials {Concept = Материалы}` и внутренние процедуры `managment {Concept = Управление}` и `business {Concept = Бизнес-процесс}`. С точки зрения вычислительной семантики данный класс задает пользовательский тип TSubject, который определяет общий интерфейс для всех элементов модели.

Теория активных систем рассматривает два базовых способа организации совместных действий активных элементов – механизм стимулирования и механизм планирования, которые в конкретных моделях обычно тесно переплетаются [2]. Экземпляр потомка класса Context моделирует окружающую среду изучаемой системы и определяет ее системную динамику посредством понятия *эффективность функционирования* активной системы. Экземпляр потомка класса ActiveSystem моделирует саму активную систему (которая обычно рассматривается в роли центра). Экземпляры потомка класса Agent моделируют агентов, составляющих активную систему и обладающих свойством активности, в том числе способностью свободы выбора своего состояния. Агенты могут обмениваться сообщениями через экземпляры агрегации между классами Agent и ActiveSystem. Агрегация также используется как канал связи между центром и агентами. Рефлексивная ассоциация для класса Agent отражает возможность существования прямых связей между агентами. Ментальность агентов будем моделировать исходя из гипотез рационального поведения и благожелательности. Для многих задач также необходимо выделение отдельного класса рефлектирующего агента.

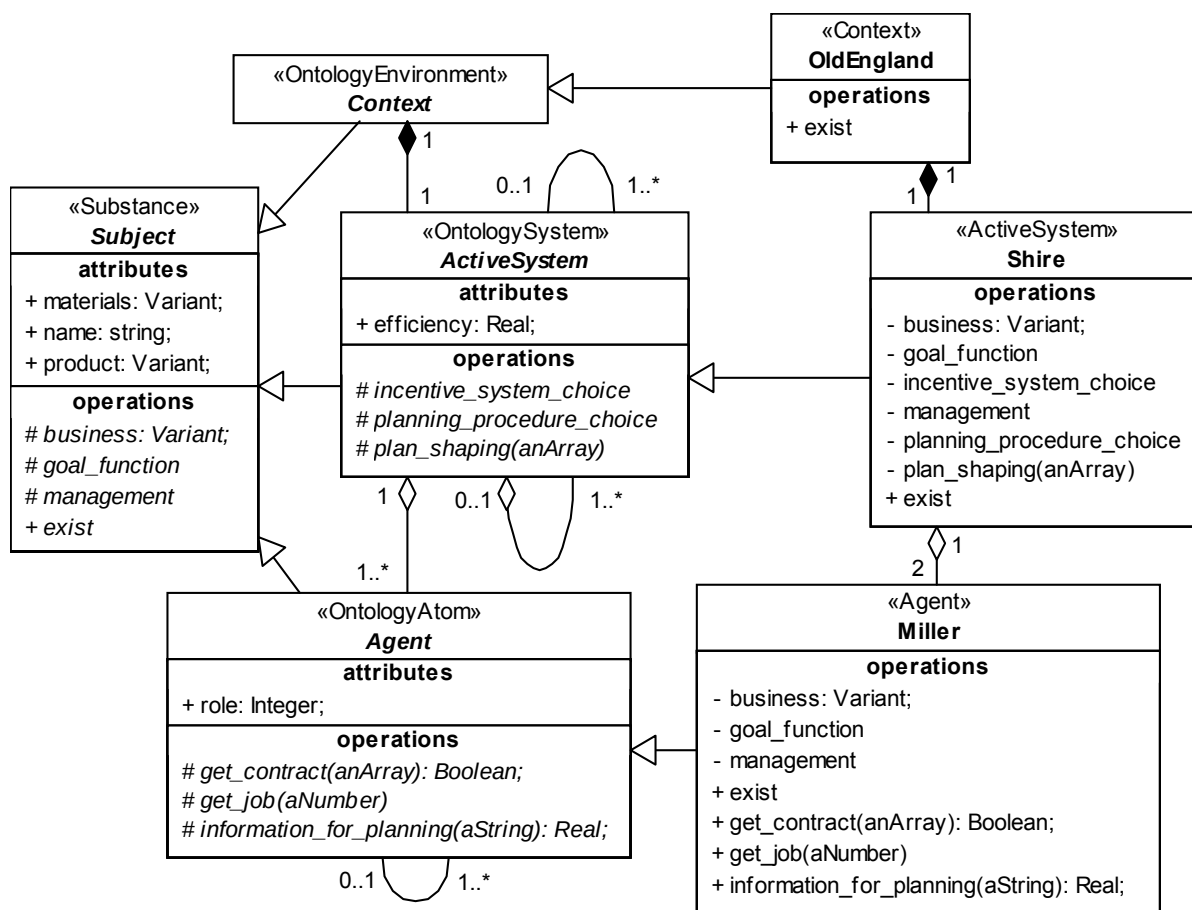


Рис. 1. Диаграмма классов для имитационной модели активной системы

На рис. 1. имена классов, методов и процедур совпадают с концептами, присвоенными им. Подчеркнем, что это исключительно мнемонический прием, поскольку в *Scientific Profile* существует регулярный механизм назначения предметной семантики программным сущностям. Для этой цели используется механизм значений с меткой Concept. Кроме того, мы предполагаем, что для модели использован субпрофиль (стереотипы субпрофиля находятся в отношении обобщения со стереотипами профиля). Для определения концептов субпрофиля использован глоссарий из книги [2].

В качестве примера объектной модели рассмотрим задачу «Лорд и два мельника». Центр организует бизнес-процесс при условии, что существует дефицитный ресурс (вода) и два агента (водяные мельницы). Затем бизнес-процесс выполняется и вычисляется эффективность управления. Имитационная модель учитывает стимулирующие, институциональные, мотивационные механизмы и несколько механизмов распределения ресурса (в примере их два). Все процессы являются параллельными и взаимодействуют между собой как путем обмена сообщениями, так и посредством общих переменных. Центр принимает решения на основе сообщений агентов, которые могут содержать недостоверную информацию (тем самым возникает ситуация игры). Подробнее об этих механизмах управления см. [2]. Целью *Исследователя* (стереотип *Researcher* "metaClass" Actor, {ProfileConcept = Researcher}) является поиск решения игры с учетом одновременного воздействия всех механизмов управления и некоторых других факторов.

Обратимся теперь к формальным моделям имитирующих программ, которые будем рассматривать как модели объяснения.

Формальные модели программных симуляций. В *computer science* известны многочисленные формальные модели программ, появление которых в значительной степени продиктовано проблемами верификации. Наиболее эффективным методом является *model checking* [3]. Представляется полезным применить данный метод в имитационном моделировании. На этапе разработки имитационной модели метод *model checking* сохраняет свою традиционную роль – как инструмент верификации. Однако на этапе эксплуатации его роль кардинально меняется, поскольку *model checking* можно рассматривать как метод исследования. Покажем, как это можно сделать для имитационных моделей активных систем.

Метод *model checking* применяется итерационно. Последовательность действий на каждой итерации может быть следующей.

1. Определяется (или модифицируется) множество атомарных высказываний AP и множество начальных состояний S_0 . Исследуется множество состояний S , множество переходов R и определяется функция разметки L для программной симуляции посредством серии имитационных экспериментов. Генерируется структура Крипке $M = (S, S_0, R, L)$, после чего модель Крипке следует упростить. Цель этого упрощения – понижение размерности задачи.

2. В зависимости от задачи составляется (или уточняется) целостная система высказываний, адекватно отображающая теоретико-игровую ситуацию (позиционная, кооперативная, иерархическая, рефлексивная игра). Каждое высказывание записывается в виде формул CTL* и преобразуется затем к CTL или LTL.

3. Формулируется некоторая гипотеза о свойствах программной симуляции. Посредством стандартных процедур выполняются вычисления на структуре Крипке. Результат вычислений представляется в форме таблицы истинности.

Итерации выполняются до тех пор, пока не будет получено объяснение результатов имитационных экспериментов. Проведение подобных манипуляций с имитационной моделью невозможно или ограничено, так как это может поставить под сомнение валидность модели.

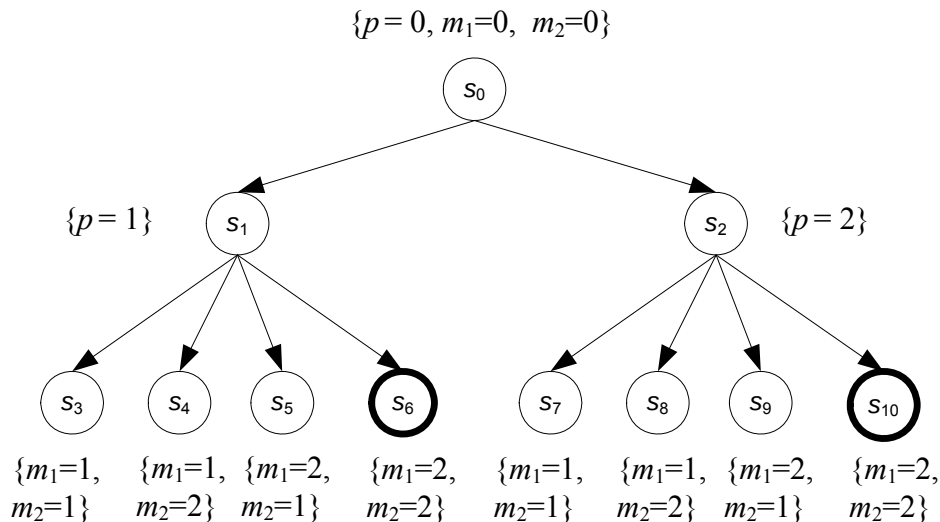


Рис. 2. Модель Крипке для программной симуляции

Вернемся к нашему примеру. На первой итерации можно выделить ведущий механизм управления – механизм распределения. Пусть множество переменных есть $V = \{p, m_1, m_2\}$, которые приобретают значения на домене интерпретации $D = \{0, 1, 2\} \times \{0, 1, 2\} \times \{0, 1, 2\}$, где 0 – игрок еще не сделал хода, 1 – выбрал первую альтернативу, 2 – выбрал вторую альтернативу. Определим множество атомарных высказываний $AP = \{p=0, p=1, p=2, m_1=0, m_1=1, m_1=2, m_2=0, m_2=1, m_2=2\}$. Высказывания

будут следующие: $p = 1$ – центр предложил процедуру планирования, при которой агенты сообщают свои идеальные точки r_j , $j = 1, 2$ функций предпочтения; $p = 2$ – центр предложил процедуру планирования, при которой агенты сообщают заявки; $m_j = 1 - j$ -й агент сообщает недостоверную информацию; $m_j = 2 - j$ -й агент сообщает достоверную информацию. Функция разметки $L: S \rightarrow 2^{AP}$ и отношение переходов R показаны на рис. 2. Множество начальных состояний $S_0 = \{(0, 0, 0)\}$.

Приведем теперь некоторые формулы CTL* для теоретико-игровых моделей. Формулы CTL* строятся из логических операций $\vee, \wedge, \neg, \Rightarrow, \Leftrightarrow$, темпоральных кванторов **A** («на всех путях»), **E** («на некоторых путях») и темпоральных операторов **X**(neXt), **F**(Future), **G**(Global), **U**(Until), **R**(Release). В нашем случае игра будет иерархической, и для этой ситуации можно выписать следующие формулы.

1. Начальное и терминальное состояние (окончание игры)

$$f_0 = (p=0) \wedge (m_1=0) \wedge (m_2=0), f_1 = \neg (p=0) \wedge \neg (m_1=0) \wedge \neg (m_2=0).$$

2. Предтерминальное состояние

$$\neg f_1 \wedge \mathbf{EX} f_1.$$

3. Равновесие Нэша. Составим формулу, которая позволяет определять состояния равновесия в теоретико-игровом смысле. Равновесие в смысле Нэша – это такое состояние, одностороннее отклонение от которого не выгодно ни одному из агентов. Пусть w^* – экстремум целевой функции центра, а v_j^* – соответствующее значение функции предпочтения j -го агента. Расширим множество атомарных высказываний AP , добавив в него высказывания $w < w^*$ и $w = w^*$, а также $v_j < v_j^*$, $v_j = v_j^*$, $j = 1, 2$. На основе данных имитационных экспериментов выполним разметку для терминальных состояний (на рис.2 выделены состояния, в которых высказывание $w = w^*$ истинно).

Составим следующую формулу для начального состояния s_0 :

$$\varphi = \mathbf{EF}(\varphi_1 \wedge \mathbf{EX}\varphi_2) \wedge \mathbf{EG} \text{ isOptimumPath}.$$

Потребуем, чтобы подформула $\varphi_1 \wedge \mathbf{EX}\varphi_2$ была истинной в некотором предтерминальном состоянии, а φ_2 – в некотором терминальном состоянии. Формулы для φ_1 и φ_2 запишем в следующем виде:

$$\varphi_1 = \text{isOptimumPath} \wedge \neg f_1 \wedge \mathbf{AX} (\delta \wedge f_1);$$

$$\varphi_2 = \text{isOptimumPath} \wedge f_1 \wedge (w = w^*) \wedge [(v_1 = v_1^*) \wedge (v_2 = v_2^*)],$$

где $\delta = [(w < w^*) \vee (w = w^*)] \wedge [(v_1 < v_1^*) \vee (v_1 = v_1^*) \wedge (v_2 < v_2^*) \vee (v_2 = v_2^*)]$; т.е. если рассматриваемый путь оптимальный, то на следующем шаге все состояния кроме равновесного менее (точнее – не более) выигрышны для каждого игрока.

Рассмотренные формулы допускают непосредственное обобщение на некоторые модели, представляющие практическую ценность. В модель анализа прецедентов (см. [1]), в пакет со стереотипом *Epistemology Entity* необходимо добавить библиотеку процедур для вычисления **EX**, **EG**, **EU** и процедуры заполнения таблицы выполнимости подформул. Сама таблица и средства визуализации определяются в пакете со стереотипом *Research Instruments*.

Приведенные выше формулы позволяют доказывать разного рода общие утверждения о свойствах программной симуляции. В рассматриваемом примере можно доказать (вычислением), например, следующее утверждение. Существует два решения игры, а именно – метаигрок выбирает либо первую, либо вторую процедуру планирования, и оба игрока в обоих случаях сообщают истинное значение плановой информации.

В нашем примере все вычисления можно выполнить непосредственно в таблице истинности. Все формулы CTL* – формулы состояния, поэтому таблицу истинности

можно представить в следующем виде. Из таблицы после завершения вычислений можно удалить атомарные высказывания, все «ординарные» состояния (точки орбит) и подформулы. Таблица истинности тогда даст компактное и стилизованное представление множества состояний. Для нашего примера два пути будут обращать φ в истину ($s_0s_1s_6$ и $s_0s_2s_{10}$). Заметим, что если из модели ментальности агентов исключить гипотезу благожелательности (заменив ее, допустим, на противоположную), и $r_1 < 1/2$, $r_1 + r_2 > 1$, то решением игры будет только единственный путь $s_0s_1s_6$.

Свернутая таблица истинности для пути $s_0s_1s_6$

	s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}
f_0	true										
f_1				true	true	true	true	true	true	true	true
$\neg f_1 \text{ EX } f_1$		true	true								
isOptimumPath	true	true					true				
φ_1		true									
φ_2							true				
φ	true										

На последующих итерациях рассматривается влияние других механизмов управления на полученный результат. Такой анализ позволяет объяснить, почему одни механизмы распределения внезапно становятся неманипулируемыми, а другие, напротив, теряют это качество.

Итак, в статье предложен субпрофиль для объектного имитационного моделирования активных систем. Предложена методика исследования объектных моделей, за основу которой взят метод *model checking*. Приведены формулы CTL*, описывающие ситуацию иерархических игр. Реализация выполнена в среде Cincom Smalltalk (VisualWorks 7.6).

Выводы

В тех случаях, когда имитационные модели, как, например, модели организационных систем, демонстрируют сложное и неожиданное поведение, возникает настоятельная необходимость внесения в методологию имитационного моделирования средств объяснения. Необходимы методики, сочетающие традиционный имитационный эксперимент с анализом поведения симуляций на формальных моделях имитирующих программ. Подобные методики способствуют пониманию сущности явлений, дают гарантию достоверности результатов экспериментов и позволяют обобщать полученные выводы. В этом плане заслуживают внимания такие исчисления, как CCS (R.Milner), CSP (C.A.R. Hoare), π -исчисление (R.Milner) и др. В данной работе в этом качестве рассмотрен метод *model checking*.

Литература

1. Гурьянов В. И. Специальный UML-профиль для моделирования сложных систем // Информационные технологии моделирования и управления. Воронеж: Научная книга, 2010. № 3(62). С. 356–362. (см. также <http://econfr.ae.ru/article/5385>)
2. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. 584 с.
3. Кларк Э. М., Грамберг О., Пелед Д. Верификация моделей программ: Model checking М: МЦНМО, 2002. 416 с.

КАЧЕСТВО ГЕНЕРАЦИИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ В СИСТЕМАХ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ OPENGPSS, GPSS\WORLD И ANYLOGIC

Д. Г. Диденко (Киев, Украина)

Введение

Одним из современных методов анализа работы сложных систем является имитационное моделирование. Для проведения повторяющихся компьютерных прогонов стохастических моделей используются события, полученные от генераторов псевдослучайных чисел (ГПЧ). Поэтому качество псевдослучайных последовательностей имеет большое значение для получения достоверных результатов. В докладе рассматриваются современные системы имитационного моделирования OpenGPSS (<http://www.simulation.kiev.ua>) [1, 2], GPSS World [3] и AnyLogic [4], которые работают с дискретными моделями. Системы моделирования поддерживают работу с большим количеством вероятностных распределений – от Бернулли до Вейбулла: 29 распределений в OpenGPSS, в помощи AnyLogic описано 29 распределений (хотя в [4] идет речь о 37), 24 распределения в GPSS World [5, 6, 7]. Все виды распределений строятся на равномерном распределении, качество которого и оценивается далее.

Тесты псевдослучайных последовательностей

На сегодня существует много графических и статистических тестов для проверки псевдослучайных последовательностей. Среди статистических тестов широко используются следующие: NIST, TEST-U01, CRYPT-X, The pLab Project, Diehard, ENT подобное. В настоящем докладе рассматривается применение набора тестов Diehard (автор George Marsaglia) для трёх систем имитационного моделирования.

Для каждой среды моделирования была написана собственная небольшая программа на соответствующем языке (GPSS или Java), которая позволяет получить большую выборку псевдослучайных чисел с равномерным распределением. Далее с помощью пакета программ Diehard, бинарные файлы которого взяты с сайта <http://stat.fsu.edu/pub/diehard/>, выполнен анализ последовательностей чисел для каждой системы моделирования отдельно.

Описание лабораторного оборудования

Для всех практических экспериментов использовался один компьютер класса Intel Core Duo с процессором 2,1 ГГц и оперативной памятью 2 Гб, операционная система Windows XP SP3. Эксперименты ставились на системах моделирования следующих версий: OpenGPSS 1.2.1.0 (1.2.2.0), GPSS World 5.2.2. и AnyLogic 6.4.1. Все эксперименты проводились над генератором псевдослучайных чисел № 1 со следующими начальными смещениями: 300 (OpenGPSS), 200 (GPSS World) и 100 (AnyLogic).

Особенности проведения вычислительного эксперимента в системах моделирования

Для системы моделирования GPSS World при малом количестве чисел (до 4 млн) программа Diehard выдает ошибку: "run-time error F6501: Read (имя файла) – end of file encountered". Это происходит на тесте № 2 «Перестановки, которые пересекаются», хотя в тексте самого теста написано, что он обрабатывает последовательность из 1 млн. 32-битных чисел дважды.

К сожалению, сразу сгенерировать данные в бинарный файл не позволяют среды моделирования, так как поддерживается чтение и запись только текстового файла. По-

лучить конечный файл можем лишь за два шага: первый – создание текстового файла с 4 млн. строк, в каждой строке одно число, которое записано текстом, и второй – перевод текстового файла в бинарный.

Обычная программа генерирования последовательности в GPSS World в текстовый файл сначала даже для 40 тыс. чисел длится 2 ч. И только после модификации программы на GPSS генерирование такого файла происходит за 2 мин. Дело в том, что блок открытия файла OPEN долго работает. Поэтому его не нужно каждый раз вызывать для каждого транзакта, а следует перенести в отдельный часовой сегмент GENERATE, OPEN, ADVANCE, CLOSE и TERMINATE, тем самым вызвав один раз для всей программы.

Для системы моделирования OpenGPSS текстовый файл получен за 30 мин.

Промежуточный текстовый файл занимает 46 Мбайт. Затем на конвертацию в нужный бинарный файл размером 15 Мбайт с помощью VisualBasic-сценария тратится 3 мин.

Каждый тест на выходе формирует специальное число p-value из интервала [0, 1]. Результаты проведенных экспериментов приведены в табл. 1. Количество сгенерированных чисел для каждой системы моделирования – 4 млн. В таблице «+» означает, что тест пройден (если p-value принадлежит отрезку [0,025; 0,975]), а «-» – тест не пройден.

Таблица 1

Значение p-value тестов DIEHARD

№	Тест	OpenGPSS		GPSS World		AnyLogic	
1	Дни рождения (Birthday Spacings)	0,359018	+	1,000000	–	0,431397	+
2	Пересекающиеся перестановки (Overlapping Permutations)	1,000000	–	0,060425	+	0,008494	–
3	Ранги матриц (Ranks of matrices)	0,950574/ 0,991835/ 0,999961	+/-/-	0,413445/ 0,536567/ 0,097624	+/+/+	0,382749/ 0,342521/ 0,249165	+/+/+
4	Поток битов (The bitstream test)	0,805974*	+	1,000000	–	0,4825392	+
5	Обезьяньи тесты (Monkey Tests)	1,000000	–	0,585412*	+	0,494274*	+
6	Подсчёт единиц (Count the 1's)	1,000000	–	1,000000/ 0,495902*	-/+	0,558042*/ 0,587793	+/+
7	Тест на парковку (Parking Lot Test)	0,979816	–	0,751581	+	0,221977	+
8	Тест на минимальное расстояние (Minimum Distance Test)	0,992231	–	0,545258	+	0,506258	+
9	Тест случайных сфер (Random Spheres Test)	0,173505	+	0,162508	+	0,278340	+
10	Тест сжатия (The Squeeze Test)	1,000000	–	0,475504	+	0,985307	-
11	Тест пересекающихся сумм (Overlapping Sums Test)	0,919356	+	0,681207	+	0,899422	+
12	Тест последовательностей (Runs Test)	0,312858	+	0,458301*	+	0,549636*	+
13	Тест игры в кости (The Craps Test) (for no. of wins/ for throws/game)	0,406554/ 1,000000	+/-	0,214467/ 0,807587	+/+	0,343878/ 0,396355	+/+

Были полностью использованы все тринадцать тестов этого пакета. Но, конечно, прохождения (или непрохождения) тестов недостаточно, чтобы принять или отклонить гипотезу о случайности потока данных. Тесты Diehard формируют на выходе числа

* Для этого теста считается среднее арифметическое, так как выводилось много значений p-value в результирующем файле.

p-value, которые равномерно распределены в интервале $[0, 1]$, если входной поток чисел действительно случайный. Проверяем нашу «нулевую» гипотезу о входной поток через статистическую значимость по критерию Пирсона (критерий «Хи-квадрат»). Для критерия Пирсона нужно много реализаций, а тестов всего 13, поэтому используем все значения p-value из результирующего файла, там их около 240 (!). Результаты расчетов по критерию показаны в табл. 2.

Таблица 2

Проверка статистической гипотезы о случайности потока данных

Генератор псевдослучайных чисел	Количество пройденных тестов из набора Diehard	Критерий Пирсона («Хи-квадрат»)		Анализ результата
		полученное	табличное	
OpenGPSS	5	90,00	36,2	Поток нельзя считать случайным
GPSS World	10	29,45	36,2	Поток можно считать случайным
AnyLogic	11	28,17	36,2	Поток можно считать случайным

Улучшение ГПЧ в системе моделирования OpenGPSS

Первым вариантом улучшения ГПЧ является использование встроенного ГПЧ из СУБД Oracle. Работа с системным пакетом dbms_random состоит из задания начального смещения для ГПЧ и получения следующего числа. При этом пакет уже встроен в Oracle и широко используется, что является большим преимуществом. К недостатком здесь следует отнести невозможность получить текущее смещение.

К другим способам улучшения ГПЧ относится самостоятельная реализация по заданным формализациям:

- линейный конгруэнтный метод $X_{n+1} = (aX_n + c) \bmod m$;
- квадратичный конгруэнтный метод $X_{n+1} = (dX_n^2 + aX_n + c) \bmod m$;
- генератор на основе объединения путём сложения по $\bmod 2^{32}$ двух генераторов: запаздывающего генератора Фибоначчи $X_n = X_{n-99} \cdot X_{n-33} \bmod 2^{32}$ и генератора на основе произведения с переносом $Y_n = 30903 \cdot Y_{n-1} \text{ carry} \bmod 2^{16}$;
- генератор М-последовательностей;
- вихрь Мерсена.

При этом возможны модификации линейного конгруэнтного метода:

- расширенный конгруэнтный генератор – $X_n = 2^{13} (X_{n-1} + X_{n-2} + X_{n-3}) \bmod (2^{32} - 5)$;
- алгоритм “Marsaglia-Multicarry” (Джордж Марсаглия);
- алгоритм “xor-shift” (Джордж Марсаглия);
- алгоритм Блюма-Блюма-Шуба;
- генератор на базе произведения с переносом – $X_n = (2111111111 X_{n-4} + 1492 X_{n-3} + 1778 X_{n-2} + 5115 X_{n-1}) \text{ carry} \bmod 2^{32}$;
- генератор на базе произведения с переносом – $X^n = a X_{n-1} \text{ carry} \bmod 2^{32}$.

Для улучшения качества сгенерированной последовательности решено использовать линейный конгруэнтный метод с различными значениями a , m и c для широко-распространённых библиотек и языков программирования, приведённых в табл. 3.

После замены алгоритма генерирования случайных чисел получаем следующие прогоны батареи тестов Diehard (табл. 4) в новой версии системы моделирования OpenGPSS 1.2.2.0.

Таблица 3

Примеры Линейного Конгруэнтного Метода

№	Источник	m	a	c	Биты
1	ANSI C: Open Watcom, Digital Mars, Metrowerks, IBM VisualAge C/C++	2^{32}	1103515245	12345	16..30
2	Apple CarbonLib	$2^{31}-1$	16807	0	0..31
3	Borland C/C++	2^{32}	22695477	1	0..30
4	Borland Delphi, Virtual Pascal	2^{32}	134775813	1	0..31
5	glibc (используется в GCC)	2^{32}	1103515245	12345	0..30
6	GNU Compiler Collection	2^{32}	69069	5	16..30
7	LC53 из языка программирования Forth	$2^{32}-5$	$2^{32}-333333333$	0	0..31
8	Microsoft Visual Basic (версия 6 и ниже)	2^{24}	1140671485	12820163	0.23
9	Microsoft Visual/Quick C/C++	2^{32}	214013	2531011	16..30
10	MMIX Дональда Кнута	2^{64}	6364136223846793005	1442695040888963407	0..63
11	MS Fortran	$2^{31}-1$	48271	0	0..31
12	Numerical Recipes	2^{32}	1664525	1013904223	0..31
13	Random class in Java API	2^{48}	25214903917	11	16..47
14	RtlUniform from Native API	$2^{31}-1$	2147483629	2147483587	0..31
15	(старая версия библиотеки glibc)	2^{32}	69069	1	0..31

Таблица 4

Сведенные результаты прохождения тестов DIEHARD

ГПЧ	№ теста из батареи Diehard													Всего пройдено тестов
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1. ANSI C	-	+	-/-/-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-/-	3
2. Apple CarbonLib	-	+	+/+/+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+/+	11
3. Borland C/C++	-	+	-/-/-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-/-	4
4. Borland Delphi, Virtual Pascal	-	+	+/+/-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-/-	4
5. glibc	-	+	-/-/-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-/-	4
6. GNU Compiler Collection	-	-	-/-/-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-/-	2
7. LC53	-	+	+/+/+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-/-	5
8. Microsoft Visual Basic	!*	-	-/-/-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-/-	2
9. Microsoft Visual/Quick C/C++	-	-	-/-/-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-/-	2
10. MMIX Дональда Кнута	+	+	-/-/+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-/-	6
11. MS Fortran	+	+	+/+/+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+/+	12
12. Numerical Recipes	-	+	+/+/-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-/-	4
13. Random class in Java API	-	-	-/-/-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-/-	2
14. RtlUniform from Native API	-	-	+/+/-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+/+	2
15. VAX's MTH\$RANDOM	-	+	+/+/-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-/-	2
16. Пакет dbm_random из Oracle XE	-	+	+/+/+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+/+	12

Из таблицы видно, что перспективнее всего использовать алгоритмы "MS Fortran" и встроенный пакет dbm_random. Для них и считается критерий Пирсона, как было уже описано ранее, а результаты заносятся в табл. 5.

Далее реализуются все 15 ГПЧ, при этом по умолчанию используется датчик "MS Fortran". Генератор из пакета dbm_random решено не использовать из-за невозможности его работы с несколькими датчиками одновременно. Теперь настройку ГПЧ

* Данный тест не выполняется из-за программной ошибки.

в системе OpenGPSS пользователь может произвести на странице «Настройки» в браузере, выбрав из списка один из 15 генераторов, приведенных в табл. 3.

Таблица 5

Проверка статистической гипотезы о случайности потока данных

Генератор псевдослучайных чисел	Количество пройденных тестов из набора Diehard	Критерий Пирсона («Хи-квадрат»)		Анализ результата
		полученное	табличное	
OpenGPSS 1.2.1.0	5	90,00	36,2	Поток нельзя считать случайным
OpenGPSS 1.2.2.0 MS Fortran	12	24,46	36,2	Поток можно считать случайным
OpenGPSS 1.2.2.0 dbsm_random	12	12,06	36,2	Поток можно считать случайным

Заключение

1. Системы моделирования OpenGPSS, GPSS World и AnyLogic можно использовать для построения стохастических моделей исследуемых систем. В новой версии системы OpenGPSS работа ГПЧ улучшена, на что указывают значения критерия Пирсона.

2. Одним из вариантов улучшения равномерности сгенерированных псевдослучайных чисел является использование не одного алгоритма получения равномерного распределения, а нескольких, отличающихся по отношению качество/скорость. Перед компьютерным прогоном экспериментатор имеет возможность выбирать режим генерирования равномерного распределения в зависимости от своих потребностей и аппаратных возможностей. К сожалению, это реализовано только в системе моделирования OpenGPSS.

3. Для улучшения поведения стохастических моделей следует использовать несколько ГПЧ. Например, количество ГПЧ в GPSS World – 10^3 , в OpenGPSS – 10^{38} , а в AnyLogic (с учетом датчиков пользователя) – не ограничено.

Литература

1. Діденко Д. Г. Порівняння генераторів псевдовипадкових чисел в системах імітаційного моделювання OpenGPSS, GPSS World та AnyLogic. //Шоста науково-практична конференція з міжнародною участю "Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС'2011". Чернівці, 2011. С. 315–318.
2. Томашевский В. Н., Диденко Д. Г. Агентная архитектура распределенной дискретно-событийной системы имитационного моделирования OpenGPSS // Системні дослідження та інформаційні технології. 2006. № 4, К.: ВПК «Політехніка», 2006. С.123–133.
3. Бражник А. Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS WORLD. СПб.: Реноме, 2006. 439 с.
4. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.
5. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. СПб.: КОРОНА-принт; М.: Альтекс-А, 2004. 384 с.
6. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 368 с.
7. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.

**ДВУХУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ
НА ОСНОВЕ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ И СИСТЕМ С ОЧЕРЕДЯМИ***

**Д. Ю. Долгушин, В. Н. Задорожный (Омск),
С. В. Кокорин (Санкт-Петербург)**

Введение

Моделирование дорожного движения с применением теории клеточных автоматов (КА) в течение двух последних десятилетий стало одним из традиционных способов отображения динамики автотранспортных потоков. Модели данного типа позволяют воспроизводить ряд характерных для потоков автомашин явлений, наблюдаемых в действительности: гистерезис скорости при изменении плотности движения, ударные волны, старт-стопное движение и т.п. [1].

Поскольку одним из основных свойств КА является параллельное обновление конфигурации, и новое состояние каждой клетки зависит лишь от ее текущего состояния и состояний ближайших соседей, естественным направлением развития программной реализации сложных моделей на КА является распараллеливание процесса моделирования. Такая реализация моделей дорожного движения позволяет в реальном масштабе времени поддерживать принятие решений при проектировании и реконструкции улично-дорожных сетей (УДС) мегаполисов.

В то же время при решении оптимизационных задач в ходе проектирования или реконструкции транспортных потоков и УДС, содержащих многие сотни дорог и перекрестков, возможности моделей на КА ограничены. Предлагаемый подход, основанный на совместном использовании КА и моделей массового обслуживания, позволяет на порядок ускорить решение задач оптимизации.

Имитационная модель дорожного движения на клеточных автоматах

В работе [2] представлена модель, основанная на стохастическом многополосном транспортном КА и включающая правила “медленного старта” (slow-to-start) и “пространственного упреждения” (spatial anticipation) [1]. Время в модели дискретно; одна итерация (обновление конфигурации автомата) соответствует одной секунде – среднему времени реакции водителя на изменение дорожной ситуации. Обновление конфигураций ведется по заранее заданному набору правил, определяющему реакцию каждого автомобиля (ускорение, торможение, перестроение) на дорожную ситуацию (наличие выбоин, других машин, сигналы светофора и пр.). Возможность учета эксплуатационного состояния дорожного покрытия и локальных скоростных ограничений, а также включение вероятностного правила “превышения скорости” отличает модель от существующих аналогов (см. подробный обзор в работе [1]).

На базе данной модели с целью исследования движения транспортных потоков по *сети дорог* разработана модель УДС [3, 4], ключевым элементом которой является узел. Данный элемент предназначен для связывания дорог и передачи машин между ними. В набор элементов сети дорог также входят: светофор, перекресток (регулируемый и нерегулируемый), пешеходный переход. Использование данных элементов позволяет строить произвольные конфигурации УДС.

Возможность имитации индивидуального поведения каждой машины, вытекающая из высокой разрешающей способности КА, реализуется за счет использования больших вычислительных мощностей. Поскольку с увеличением масштабов модели-

*Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ (проекты №10-08-00906, №10-08-90027_Бел-а, 11-08-01016, 11-08-00641, 11-08-00767), ОНИТ РАН (проект 2.3).

руемых УДС возрастает и время, требуемое для продвижения модели на один шаг обновления, естественно использовать разделение модели УДС города на более мелкие (районы, кварталы), передаваемые разным исполнителям – процессорам многоядерных систем, узлам вычислительных кластеров и т.д.

Параллельные вычисления

Абстрагируясь от технической реализации многопроцессорной обработки КА, можно сказать, что существует *задача*, под которой понимается некоторая часть моделируемой УДС (совокупность связанных узлами дорог), которая должна быть передана *исполнителю* (процессору, узлу кластера). Исполнитель, работающий под контролем некоторого координирующего объекта (*координатора*), по соответствующему сигналу выполняет одну итерацию. По выполнении шага обновления автомобили, достигшие *граничных узлов* УДС (выходы или входы которых связаны с узлами другой задачи), должны передаваться на соответствующие узлы, принадлежащие другим задачам. Аналогично автомобили из других задач, достигшие граничных с данной задачей узлов, должны быть переданы и размещены на ее граничных узлах.

На рис. 1 приведен пример модели дорожной сети (центр Омска), разделенной на две задачи. Черным цветом на рисунке закрашены граничные узлы.

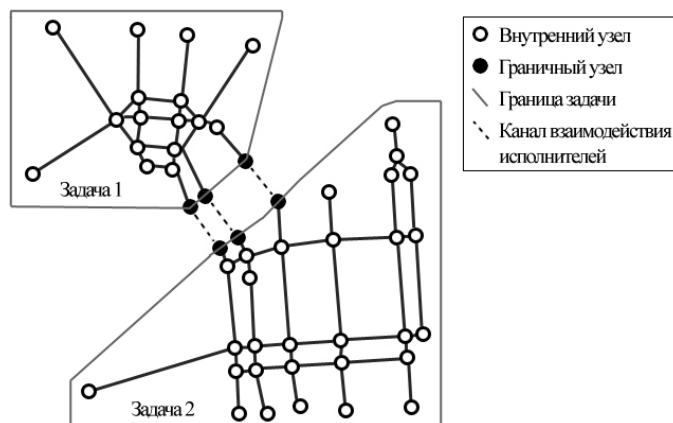


Рис. 1. Пример разбиения модели УДС на задачи

Программная реализация модели (на примере фрагмента УДС Омска, рис. 1) позволяет воспроизводить движение потоков автомашин с его визуализацией в ускоренном режиме на персональном компьютере средней мощности. Приведённый фрагмент включает 45 узлов, соединяющих 170 прямолинейных участков дорог. Начаты работы по реализации параллельной версии модели на вычислительном кластере ОмГТУ.

Уровень сети массового обслуживания

Если оптимизация выполняется в обширном пространстве вариантов, то эффективно реализовать ее можно путем представления УДС в виде сети массового обслуживания (СеМО), сохраняющей структуру УДС и основные параметры, которыми определяются вероятностно-временные характеристики (ВВХ) движения транспорта. Такую сеть с очередями будем далее называть транспортной СеМО.

Сохраняя функциональное пространство УДС, транспортная СеМО абстрагируется от пространства физического, учитываемого на уровне КА, и от соответствующих явлений, определяемых взаимным расположением в нем автомобилей. Будучи ориентированной сетью с однонаправленными дугами, транспортная СеМО не учитывает взаимодействия автомобилей, движущихся по встречным полосам: двусторонняя дорога представляется в СеМО двумя независимыми дугами, передающими заявки от

одних узлов СеМО к другим. Узел СеМО – система массового обслуживания (СМО) – представляет собой место формирования очереди на данном автотранспортном маршруте, т.е. пешеходный переход, перекресток и т.п. Циклическую смену сигналов разрешения и запрета движения через перекресток можно учитывать, задавая в СМО соответствующим образом случайное время обслуживания заявок. Среднее время обслуживания должно быть равно среднему времени проезда через перекресток (без очереди), а дисперсию этого времени можно определить так, чтобы средняя длина очереди в СМО была равна средней длине очереди у перекрестка на данном направлении. Для улучшения качества аппроксимации можно использовать многоканальные СМО. Физически единый перекресток разделяется в транспортной СеМО на несколько независимых СМО, лежащих на соответствующих разных маршрутах заявок.

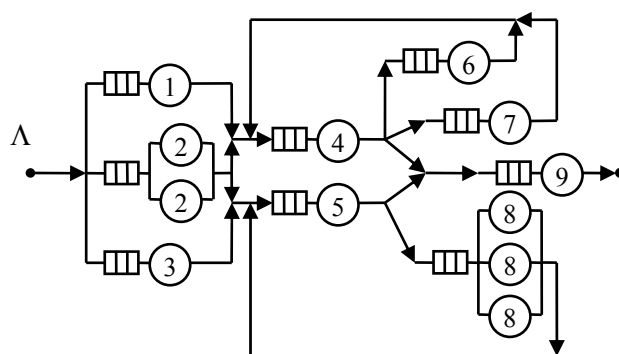
Особенностью транспортной СеМО является и то, что прохождение заявки от одного ее узла с очередью до другого происходит не мгновенно. На это тратится время, сравнимое со временем прохождения узла с очередью. И чтобы оставаться в рамках традиционных представлений СеМО, каждую дугу, соответствующую дороге, можно представлять в виде СМО с бесконечным (или очень большим) числом каналов, время обслуживания в которых равно времени проезда по этой дороге.

Еще одна важная особенность транспортной СеМО состоит в том, что ее переходные вероятности являются функциями известных интенсивностей маршрутов, сливающихся и расходящихся на перекрестках. Если маршрут представляет собой пучок маршрутов, т.е. у него имеются альтернативы, характеризующиеся вероятностями их выбора, то эти вероятности также влияют на переходные вероятности СеМО.

Представление УДС в виде транспортной СеМО позволяет на два-три порядка ускорить имитационное моделирование (ИМ) и решать оптимизационные задачи. Методы аналитико-имитационного моделирования немарковских СеМО [5–7] позволяют еще на порядки ускорять решение оптимизационных задач и с достаточно хорошей для практических целей точностью оптимизировать СеМО, содержащие сотни узлов.

Пример оптимизации транспортной СеМО

В качестве примера рассмотрим оптимизацию транспортной СеМО, представленной на рис. 2. Для простоты будем считать распределения времени обслуживания экспоненциальными, входной поток – пуассоновским.



$$\Lambda = 1,$$

$$p_{0,1} = 0.25, p_{0,2} = 0.36, p_{0,3} = 0.39, p_{2,4} = 0.86, p_{2,5} = 0.14,$$

$$p_{4,6} = 0.17, p_{4,7} = 0.64, p_{4,9} = 0.19, p_{5,8} = 0.31, p_{5,9} = 0.69.$$

Рис. 2. Пример СеМО, соответствующей некоторому фрагменту УДС

Через сеть проходят пять безальтернативных маршрутов заявок, содержащих циклы (табл. 1). Круглыми скобками обозначена часть цикла, среднее число выполнений которой указано счетчиком n_j . Интенсивность входа в сеть заявок i -го безальтерна-

тивного маршрута обозначена через α_j . Эти маршруты соответствуют маршрутному пассажирскому транспорту. Кроме того, через сеть проходят три маршрутных пучка с интенсивностями B_i . Вероятность выбора из пучка i альтернативы j обозначена q_{ij} .

Таблица 1

Маршруты и их характеристики

j	Безальтернативные маршруты	α_i	n_i	Пучок 1, $B_1 = 0.1$	q_{1j}	Пучок 2, $B_2 = 0.3$	q_{2j}	Пучок 3, $B_3 = 0.2$	q_{3j}
1	1-4-(6-4)-9	0.1	2.333	1-4-6-4-9	0.1	1-4-9	0.1	2-5-8-5-9	0.1
2	1-4-(7-4)-9	0.1	9	1-4-7-4-9	0.1	2-4-9	0.1	3-5-8-5-9	0.9
3	2-4-(6-4)-9	0.1	2.333	2-4-6-4-9	0.1	2-5-9	0.1	—	—
4	2-4-(7-4)-9	0.1	9	2-4-7-4-9	0.7	3-5-9	0.7	—	—

Указанные в табл. 1 параметры СеМО определяют интенсивности заявок на ее дугах и затем переходные вероятности (значения которых приведены на рис. 2). Формула каждой такой вероятности представляет собой дробь – отношение суммы интенсивностей маршрутов, проходящих по соответствующей выходной дуге узла, к сумме интенсивностей маршрутов, входящих в узел. Слагаемые в числителе и знаменателе дроби в общем случае являются интенсивностями α_i безальтернативных маршрутов (возможно, помноженными на счетчики n_i) и интенсивностями $\beta_{ij} = q_{ij}B_i$ альтернатив.

Далее среднее время E прохождения заявок через сеть рассчитывается известными методами с учетом интенсивностей обслуживания, очередей и средних задержек π_{ij} на дугах (i, j) . В общем случае – с использованием ИМ. Для СеМО на рис. 1 это время составило $E = 340.7$ при указанных в табл. 2 средних задержках на дугах и интенсивностях обслуживания в узлах $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_9$, равных 0.31, 0.22, 0.48, 3.60, 0.79, 0.60, 2.31, 0.08, 1.23 соответственно.

Таблица 2

Средние задержки π_{ij} на дугах (i, j) в исходном варианте СеМО

π_{01}	π_{02}	π_{03}	π_{24}	π_{25}	π_{46}	π_{47}	π_{49}	π_{58}	π_{59}	π_{14}	π_{35}	π_{64}	π_{74}	π_{85}
5.71	6.10	6.21	5.92	5.13	6.61	83.3	6.94	5.55	6.41	5.71	6.21	6.61	83.3	5.55

Средние задержки на дугах-дорогах определяются с учетом интенсивности движения по ним и фундаментальных диаграмм дорог, дающих зависимости средней скорости движения автомобиля от плотности потока.

При оптимизации сети перераспределялся общий ресурс ее узлов (сумма взвешенных интенсивностей μ_i), общий ресурс улучшения дорог (в стоимостном выражении) и вероятности q_{ij} выбора альтернативных маршрутов в пучках. Как показали полевые испытания модели на КА, проведенные в Омске, эта модель после ее калибровки характеризуется высокой точностью прогноза времени прохождения автомобилями разнообразных маршрутов. Пример диаграмм на рис. 3 слева, полученных с помощью модели на КА, показывает, что эффект улучшения дороги можно учитывать соответствующим коэффициентом, входящим в зависимость скорости движения от плотности потока. При оптимизации СеМО на рис. 1 этот коэффициент допускалось изменять на 20% при сохранении суммы изменений. В результате оптимизации распределения двух видов ресурса (узлов и дорог) и вероятностей выбора альтернатив показатель E снизился с 340.7 до 187.7. Задержки на дорогах в последнем значении составляют 154,0. Полученный вариант распределения ресурса проверен на устойчивость по отношению к

эволюционному уравниванию средней длительности альтернативных маршрутов, лежащих в пределах пучка [8]. После их уравнивания внутри пучков оптимальные вероятности выбора маршрутов изменились незначительно, и показатель E увеличился со 187.7 до 188.2. Изменение переходных вероятностей СеМО в результате оптимизации лежало в пределах 15%. Вероятности q_{12} и q_{14} снизились до нуля.

В связи с ограниченным объемом статьи в рассмотренном примере оптимизации транспортной СеМО показана лишь общая логика решения задачи.

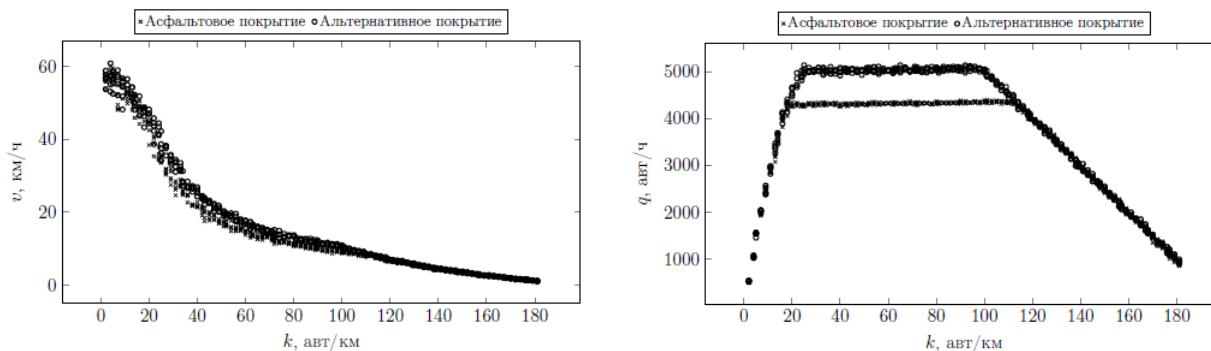


Рис. 3. Фундаментальные диаграммы, получаемые КА-моделью:

слева – зависимость скорости автомобилей от плотности потока,

справа – зависимость потока от плотности.

Показано изменение диаграмм после замены асфальтового покрытия альтернативным

Двухуровневое моделирование, в котором используются КА и транспортные СеМО, позволяет продолжать оптимизацию за счет возвращения результатов решения задачи на СеМО в модель на КА. С ее помощью свойства полученного варианта уточняются, в том числе и экспертными методами, после чего может быть выполнен новый цикл оптимизации на СеМО, начинающийся из варианта, полученного на уровне КА.

Моделирование подтвердило предположение, что в случае невысоких коэффициентов загрузки для адекватного описания СеМО достаточно знать интенсивности потоков. С увеличением загруженности дорог требуется более точная характеристика времени прохождения машинами конкретных участков дорог и фрагментов УДС. Таким образом, транспортная СеМО позволяет определять требования к точности оценки этих характеристик КА-моделью. Предлагается в качестве типичной характеристики времени проезда участков и фрагментов определять его коэффициент вариации [9].

Транспортная СеМО может быть использована как агрегирующая модель, позволяющая быстро рассчитывать глобальные (общесистемные) ВВХ УДС на основе локальных показателей, оцениваемых КА-моделью. Разработанные численные методы анализа [10] и оптимизации [11] СеМО лишь в редких случаях требуют обращаться в ходе их использования к ИМ. Большие фрагменты больших УДС можно сначала переводить на уровень соответствующих им СеМО, а затем полученную связную совокупность СеМО реализовать с применением параллельных вычислений.

Выводы

Построение дорожных сетей на базе предлагаемого двухуровневого подхода с применением параллельных вычислений позволяет:

- исследовать возможность и целесообразность реструктуризации УДС;
- оценивать схемы светофорного регулирования;
- выделять оптимальные по времени прохождения маршруты движения;

- прогнозировать распределение автотранспортных потоков по дорожной сети при заданных дорожных условиях (плотность движения, схемы регулирования, возможность перекрытия движения на отдельных дорогах);
- эффективно синхронизировать распределённые имитационные модели.

Литература

1. **Maerivoet S., De Moor B.** Cellular Automata Models of Road Traffic // *Physics Reports*. 2005. Vol. 419. No. 1. P. 1–64.
2. **Долгушин Д. Ю., Мызникова Т. А.** Имитационное моделирование дорожного движения для оценки экологического влияния автотранспорта // *Системы управления и информационные технологии*. 2009. 4.1(38). С. 139–142.
3. **Долгушин Д. Ю., Мызникова Т. А.** Компьютерное моделирование движения городского автотранспорта // *Материалы 64-й научно-технической конференции ГОУ “СибАДИ” в рамках Юбилейного Международного конгресса “Креативные подходы в образовательной, научной и производственной деятельности”, посвященного 80-летию академии*. Омск: СибАДИ, 2010. Кн. 2. С. 68–72.
4. **Долгушин Д. Ю.** Библиотека моделирования автотранспортных потоков “Трафика” // *Хроники объединенного фонда электронных ресурсов “Наука и образование”*, 2010. №12 (19). URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2010/12.doc> (дата обращения: 28.03.2011).
5. **Задорожный В. Н.** Оптимизация однородных немарковских сетей массового обслуживания // *Проблемы управления*. 2009. № 6. С. 68–75.
6. **Задорожный В. Н.** Распределение каналов в однородных немарковских сетях с очередями // *Омский научный вестник*. 2010. № 1 (87). С. 5–10.
7. **Кокорин С. В., Соколов Б. В.** Комбинированный метод оптимизации структуры замкнутых однородных сетей массового обслуживания // *IV Всероссийская конференция «ИММОД-2009»*. Т. 1. СПб.: ЦНИИТС. 2009. С. 149–151.
8. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский, Я. А. Холодов, Н. Б. Шамрай. М.: МФТИ, 2010. 362 с.
9. **Кокорин С. В., Рыжиков Ю. И.** Автоматический синтез программ расчёта систем и сетей обслуживания // *IV Всероссийская конференция «ИММОД-2009»*. 2009.
10. **Рыжиков Ю. И.** Машинные методы расчёта систем массового обслуживания. СПб.: ВИКИ им А. Ф. Можайского, 1979.
11. **Kokorin S., Sokolov B.** Numerical Methods of Structure Optimization of Homogeneous Queuing Networks // *Proceeding of the 7th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation*, 2010, 2, 29.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

А. А. Емельянов, Е. А. Власова, Н.З. Емельянова (Москва)

Введение. Термин *инвестиция* произошёл от латинского *investire* – облачать. Во времена феодализма инвеститурой назывался ввод вассала во владение феодем. В последующие эпохи экономического развития слово *инвестор* традиционно толковалось как вкладчик, а *инвестирование* – как помещение, *вкладывание* капитала.

Но в настоящее время такое толкование не только вносит многозначность в понятие *инвестор*, но и сдвигает смысл этого слова в область несуществующих явлений. По сути, понятие *вкладчик* (равно как и вклад) неспецифично не только для одного инвестиционного процесса, но и для всей инвестиционной сферы деятельности: вкладчиком мог быть не только инвестор, но также, к примеру, спонсор, меценат или акционер. Поэтому при реализации сложных инвестиционных проектов понятие инвестор не может толковаться в деловых кругах как вкладчик [1]; а инвестирование – это не только внесение вклада (инвестиционных сумм), но и ряд иных действий инвестора.



Рис. 1. Инвестиционный процесс

Системное обоснование. Сущность инвестиционного процесса заключается в том, что *инвестор* (субъект инвестиций) и *объект инвестиций* находятся в тесной системной взаимосвязи (рис. 1). Инвестор не просто выдаёт денежные суммы или спонсирует "наудачу", рискуя ничего не получить (и здесь нельзя не вспомнить экономическое определение риска, которому более 200 лет: "Возможность потерь в расчёте на счастливый случай" [2]). Дело в том, что инвестор принимает активное участие в этом процессе, в том числе, и в борьбе с рисковыми явлениями, а свойства инвестора подвержены системным изменениям на протяжении этого процесса: они адаптируются к *инвестиционной системной среде*. Поэтому

более подходящими к обсуждаемой тематике являются следующие определения [1]:

Инвестор – субъект, ориентированный на изменение свойств объекта инвестиций, позволяющее при минимальных вложениях в этот объект восполнить дефицит необходимых для собственного развития ресурсов и изменить собственные свойства в нужном для себя направлении.

Инвестиционный процесс – специфичный для определенной инвестиционной среды процесс приобщения инвестора к объекту инвестиций, осуществляемый с целью получения управляемого инвестиционного дохода посредством инвестирования.

Инвестиционная системная среда – единичная или множественная сфера деятельности (внешняя среда), преимущественно определяющая специфику и предметное содержание инвестиционного процесса.

Типичным примером проявления взаимосвязей являются инвестиционные проекты, участниками которых являются две стороны: инвесторы-землепользователи и муниципальные власти. На территориях муниципалитета ведётся строительство крупных объектов, предназначенных для развития жилищной, хозяйственной или культурно-оздоровительной инфраструктуры города: жилых комплексов, предприятий сферы

услуг, супермаркетов, муниципальных рынков, дворцов спорта и др. Обеим сторонам объект нужен, но интересы у них различные. Дело в том, что стороны взаимодействуют по ресурсам, главным образом, по земле:

- инвестору нужно получить участок земли под застройку, но за это он должен выплатить огромный целевой взнос за право аренды и осуществлять платежи по налогу за землю, который тоже весьма большой;

- муниципальным властям, у которых есть законная возможность варьировать как целевой взнос, так и налоговые платежи, кроме строительства объекта есть и другой интерес – повысить размеры этих платежей, которые пополняют муниципальный бюджет и также идут на поддержку инфраструктуры муниципалитета.

В связи с этим, существуют какие-то адаптируемые экстремальные решения о платежах: если их делать очень малыми, то пострадает бюджет, но если сделать очень большими, то инвестору станет невыгодно продолжать участие в инвестиционном проекте. И тогда под угрозой больших потерь или банкротства он выйдет из консорциума с властями, оставив нереализованный или сильно испорченный нулевым циклом земельный участок. Поэтому для адаптивной корректировки условий и платежей в процессе управления необходима некая настраиваемая модель.

Теоретически (и только) инвестиционный процесс можно рассматривать как процесс управления в системе с обратной связью в виде кибернетической модели с настраиваемой моделью в контуре обратной связи, выполненной в соответствии с классической теорией автоматического управления. Однако такая идеализированная модель в данном случае *неприменима*, так как раскрыть математическую сущность и формализовать передаточные функции её компонентов [3] *практически невозможно*.

Имитационная модель инвестиционного процесса. Учитывая сложности применения классического математического аппарата для исследования экономической динамики инвестиционного процесса, необходимо создание соответствующей имитационной модели, которая компенсирует недостатки математического аппарата. Особенности такой модели и её *новизна* заключаются в том, что она учитывает *согласованность* интересов инвестора и потребителей объекта инвестирования в конечном результате и *противоречия* их интересов при формировании бюджета инвестиционного проекта на этапе строительства и во время эксплуатации, что способствует проявлению нежелательных рискованных явлений и противодействует темпам реализации проекта.

Кроме вышеуказанных особенностей к модели инвестиционного процесса выдвигаются следующие взаимосвязанные требования, которые необходимо учитывать при её создании.

1. Необходим формальный аппарат реализации финансовой динамики. Средства управления текущими, будущими и отложенными событиями не имеют некоторых свойств для реализации этого требования.

2. Должна быть предусмотрена возможность трансформации структуры модели.

3. Модели должны "предугадывать" риски. Риск в соответствии с математической интерпретацией общего определения – это нежелательное событие, имеющее два взаимно независимых параметра: 1) вероятность его появления на заданном интервале времени; 2) наносимый ущерб – в случае свершения этого события.

4. Необходим аппарат пространственной динамики.

5. Денежные "потoki" в модели практически невозможно анализировать с позиций системной динамики, поскольку они таковыми не являются. Любая операция по перечислению денег со счёта на счёт с позиций банковского или бухгалтерского учёта проходит за нулевой отрезок времени $\Delta t = 0$, т. е. по сути является дельта-функцией.

Один из приемлемых подходов к построению модели – это реализация послойной структуры средствами Actor Pilgrim [4]. Схема такой модели может иметь в своём составе до 150 узлов, расположенных на трёх слоях.

Верхний слой описывает поведение инвестора и его конкурентов на рынке; на этом слое происходят операции по выделению земли, платежи за право аренды.

Второй слой моделирует процедуры анализа и контроля инвестиционного процесса, расписанные на среднем – втором слое; здесь осуществляются основные операции по реализации инвестиционного проекта, платежи за аренду, по штрафам и пени.

Третий слой по сути является ядром имитационной модели, поскольку именно на нём происходят опосредованные взаимодействия всех компонентов модели первого и второго слоёв через операции по счетам, если эти взаимодействия невозможно выполнить непосредственно (рис. 2).

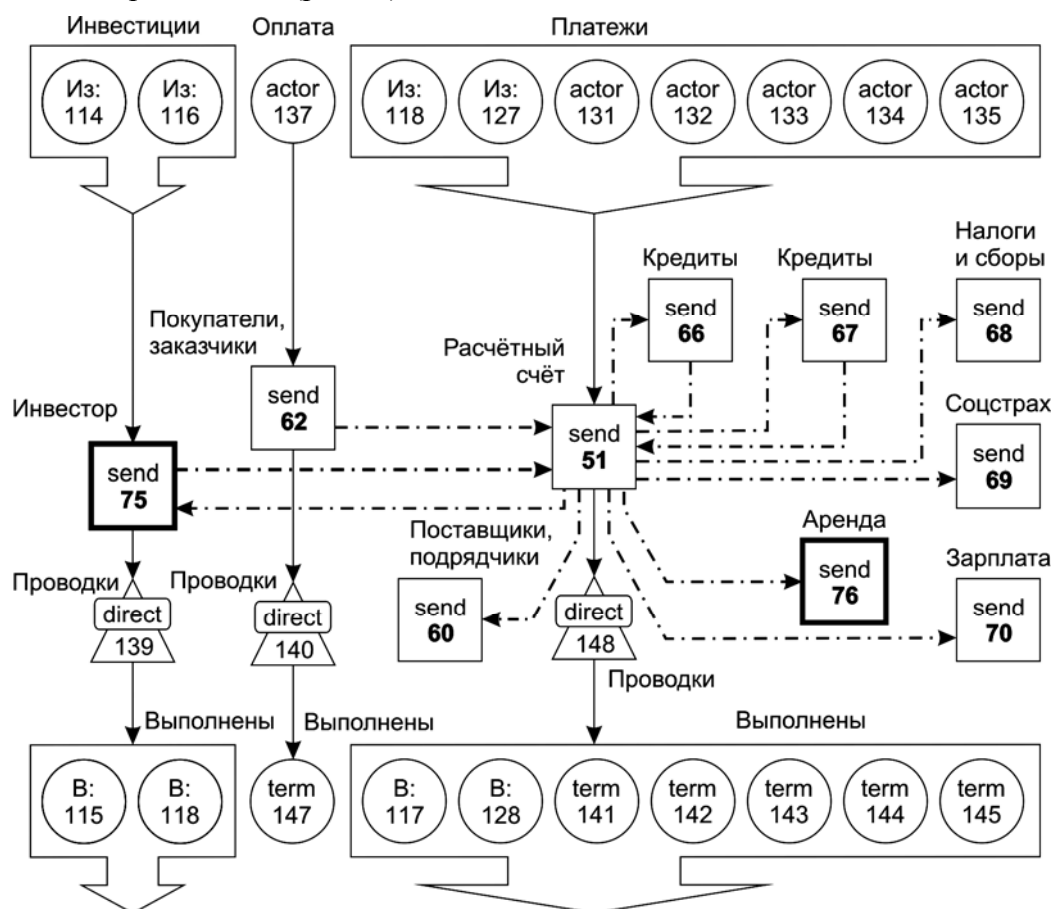


Рис. 2. Ядро модели

На третьем слое можно смоделировать непростые взаимоотношения инвестора с муниципалитетом, банками, поставщиками и подрядчиками, работниками-исполнителями и будущими обладателями благ – потребителями объекта инвестирования: частей объекта, квартир (если это жилой объект) или услуг. Всего на таком слое необходимо смоделировать не менее 10 счетов бухгалтерского учёта, динамика состояний которых сильно влияет на основные задержки инвестиционного процесса: 51 – расчётный счёт; 60 – поставщики, подрядчики; 62 – покупатели, заказчики; 66 – краткосрочные кредиты и займы; 67 – долгосрочные кредиты и займы; 68 – налоги и сборы; 69 – социальное страхование и обеспечение; 70 – заработная плата; 75 – взаимоотношения с инвестором; 76 – арендные платежи. Этот модельный слой требует для реали-

зации не менее 24 узлов. Особо выделены счета 75 и 76, через которые проходит взаимодействие сторон: муниципалитета и инвестора-землепользователя.

В процессе экспериментов с имитационными моделями инвестиционного процесса замечено интересное свойство: они ведут себя аналогично дискретной системе по правилам теории автоматического управления. Например, если модель упростить, исключив из неё свойства реорганизации и инерционности, то перечисление определённой суммы на вход системы (аналог дельта-функции) приводит к эффекту образования ступеньки на выходе в виде последовательности дискретных сигналов, что свидетельствует о включении дополнительной экономической мощности, производящей продукцию в единицу времени, аналогично интегрирующему операционному усилителю¹.

В докладе на примере разбираются варианты решений по инвестиционному проекту (исходные данные приведены в таблице, принимаемых с помощью такой модели.

**Структура затрат и доходов инвестора
на земельном участке размером 1 га (ТЭЗ 18)**

Виды расходов или доходов по проекту		Сумма, €
1.	Расходы на реализацию инвестиционного проекта ($t \geq t_p$)	37 500 000
1.1.	Денежные ресурсы, изъятые из оборотных средств инвестора-землепользователя (объем инвестиций), в том числе:	30 000 000
	• заключение архитектурно-правового управления	1 000
	• исходно-разрешительная документация в составе градостроительного заключения	2 000
	• разработки и утверждение проекта объекта на земельном участке	5 000
	• плата за право аренды земельного участка (за 49 лет)	2 500 000
	• затраты на развитие района (расширение материально-технической базы школ, спортивных сооружений и др.) по трехстороннему контракту с Административным округом (АО) и Управой района (УР) за $t_p=3$ года	600 000
	• маркетинг в связи с возможной продажей объектов (зданий, сооружений), готовых к эксплуатации	2 000
	• арендная плата за земельный участок, 2 % стоимости за $t_p=3$ года	45 000
	• затраты на строительство (включая стоимость проектирования)	19 345 000
1.2.	Неполученная прибыль в связи с отвлечением оборотных средств	7 500 000
2.	Затраты на эксплуатацию объекта ($t > t_p$) в год	
2.1.	Эксплуатация объекта (зданий, сооружений, объектов культуры), построенного или реконструированного в процессе реализации инвестиционного проекта	Параметр X
2.2.	Арендная плата за земельный участок, 2 % стоимости в год	15 000
2.3.	Платежи по трехстороннему контракту с АО и УР, в год	600 000
3.	Разовые доходы инвестора после завершения инвестиционного проекта ($t > t_p$) – выручка от продажи объекта (или его части)	Параметр Y
4.	Регулярные доходы инвестора после завершения инвестиционного проекта – доход в результате эксплуатации объекта (или его части), в год	$\gamma(X, Y)$

Для простоты варьируются только 2 параметра (X и Y) и оптимизируются регу-

¹ Это ещё раз подчёркивает, что имитационное моделирование основано, в том числе, и на аналогах (соответствующие эксперименты описаны, например, в работе [6]). Об этом неоднократно вспоминал в своих работах Джеффри Гордон: "В разработке GPSS были неосознанные попытки использовать опыт аналогового моделирования, приобретенный мною при изучении управляемых ракет в исследовательской лаборатории компании General Electric в Англии" [5].

лярные доходы инвестора $\gamma(X, Y)$.

Вспомогательная аналитическая модель. Имитационная модель довольно хорошо показывает как численно, так и с помощью графиков, что происходит на входе инвестиционного процесса, что на выходе, а также динамику и конечные состояния внутренних процессов. Однако в общем потоке результатов, имеющих довольно сильные разбросы при анализе различных вариантов бизнес-процессов, трудно понять причины изменения качества и устойчивости моделируемого процесса (при этом "ловить моменты" таких изменений тоже непросто), поскольку такое понимание потребует довольно длительного по времени и количеству прогонов модели эксперимента.

На основе экономического анализа инвестиционного процесса, анализа выхода имитационной модели при входном инвестиционном воздействии получаем математический эквивалент передаточной функции процесса. С её помощью становится возможным экспресс-анализ устойчивости инвестиционного процесса, корректности объёмов инвестирования, а также правильности выбора моментов перечисления инвестиционных сумм, если перечисления планируются в несколько траншей. Кроме того, появляется возможность анализа рисков при задержках очередных траншей инвестором или при несвоевременном предоставлении кредитных сумм банком и анализа эффективности компенсационных мероприятий риск-менеджмента.

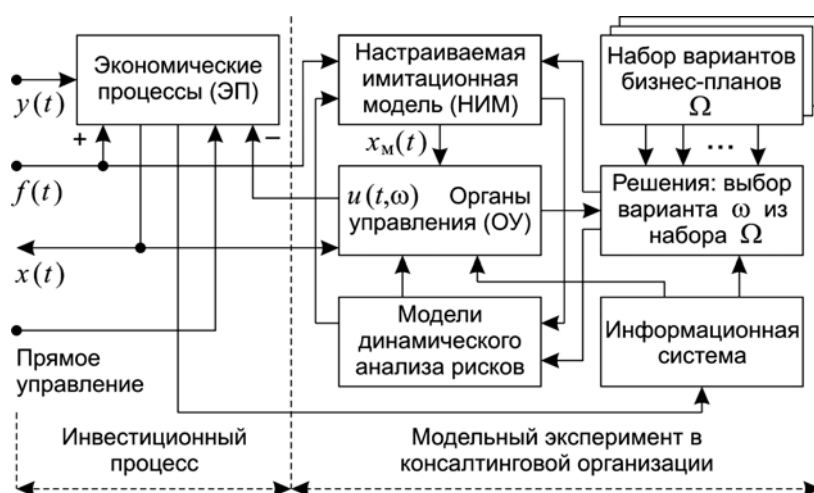


Рис. 3. Моделирующий стенд консалтинговой организации

В целом модели и методические приёмы объединяются в виртуальный "моделирующий стенд" (рис. 3). Для практической работы менеджеров проекта создана шкала порядка от 0 до 10, позволяющая ранжировать варианты бизнес-планов на основе результатов моделирования. К сожалению, часто для предварительных количественных выводов менеджеры используют swot-анализ, имеющий точность "плюс-минус в несколько раз".

Выводы и рекомендации

1. Решения по инвестиционным проектам необходимо поддерживать результатами имитационного моделирования: с применением специальных имитационных моделей и созданных на их основе инструментальных средств экспресс-анализа.
2. На этапе предварительного обоснования инвестиционных решений swot-анализ можно использовать, но только "на вербальном уровне".
3. Решения, получаемые на основе пакетов инвестиционного и финансового анализа с использованием линеаризованных представлений данных, необходимо проверять на имитационных моделях.

Литература

1. **Машкин В. И.** Сущность инвестиционного процесса. СПб: НВК "Позиция", <http://www.pozmetod.ru>, 2008.
2. Encyclopaedia Britannica. UK: London, 1974, 15 issue, 30 volumes (Британская энциклопедия, 15-е издание в 30 тт.).
3. **Анфилатов В. С., Емельянов А. А., Кукушкин А. А.** Системный анализ в управлении / Под ред. А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2009. 368 с.
4. **Емельянов А. А., Власова Е. А.** Имитационное моделирование экономических процессов. В кн.: Четвертая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности "Имитационное моделирование. Теория и практика". СПб.: ЦТСС, 2009. Т. 1. С. 19–26.
5. **Gordon G.** The development of the general purpose simulation system GPSS. In: History of Programming Languages. NY: ACM, 1981. P. 78–102.
6. **Емельянов А. А., Власова Е. А., Дума Р. В., Емельянова Н. З.** Компьютерная имитация экономических процессов. М.: Маркет ДС, 2010. 464 с.

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ****С. А. Ермаков, Е. Б. Замятина (Пермь)**

В настоящее время имитационное моделирование (ИМ) широко применяется в различных сферах науки и производства. Развитие науки и технологий, и, следовательно, рост сложности исследуемых систем ставит перед ИМ все более сложные задачи. Последовательные симуляторы не справляются с таким объемом вычислений, поэтому наиболее актуальными становятся распределенные системы моделирования. В настоящее время существуют как иностранные (TeD/GTW [1], SPEEDES [2], Task-Kit [3] и др.), так и отечественные (Мера[4], Диана [5], СИРИУС [6], OpenGPSS [7]) разработки в области распределенного моделирования. Разработка распределенных систем моделирования требует создания специального программного обеспечения, обеспечивающего корректное выполнение модели. В основе таких симуляторов лежит алгоритм синхронизации (АС) модельного времени объектов, который обеспечивает соблюдение причинно-следственных связей между объектами модели, находящимися на различных вычислительных узлах распределенной системы. Выигрыш при распределенном выполнении можно получить за счет эффективности АС. В работе авторы рассматривают особенности существующих алгоритмов, а также предлагают свой алгоритм, использующий явные и неявные знания о модели.

Алгоритм синхронизации

Целью АС является соблюдение правильной последовательности выполнения событий модели – в порядке неубывания их временных меток, для того, чтобы сохранить причинно-следственные связи. В последовательном моделировании правильный порядок обеспечивается за счет выбора на каждом шаге события с минимальной меткой из общего календаря событий всей системы, текущее модельное время одинаково для всех объектов. В распределенном варианте общий календарь отсутствует, что приводит к необходимости использования АС. Каждая часть распределенного симулятора является последовательным симулятором, содержащим часть общей модели. Традиционно такая часть называется логическим процессом (ЛП). Каждый ЛП не может заранее знать о том, на какое время будет запланировано событие, которое он получает от другого логического процесса.

По главному принципу работы, алгоритмы принято разделять на два класса: консервативные и оптимистические. Консервативные АС запрещают обработку событий со временем T , пока не будет гарантии, что ЛП не получит сообщений с временной меткой меньше T . Оптимистические АС не накладывают столь жестких ограничений, позволяя обрабатывать такие события, однако при поступлении события с временной меткой, меньшей текущего времени, организуют откат до этого момента.

Классическим консервативным АС является алгоритм «нулевых сообщений» [8]. Суть подхода состоит в том, что каждый логический процесс подсчитывает $\min(T_{inp}^i) i = \overline{1, n}$, где T_{inp}^i – временная метка последнего поступившего сообщения от ЛП_{*i*}, может продвигать время до этого минимума. Для того чтобы его расширить временные горизонты процессов и не попасть в тупиковую ситуацию, каждый ЛП по всем выходным связям при изменении своего времени посылает сообщение – либо реальное, запрограммированное в модели, либо фиктивное или «нулевое».

Классическим оптимистическим АС является алгоритм «Time Warp» [9]. Алгоритм позволяет обрабатывать любые события, но при поступлении сообщения с временной меткой T^* , меньшей текущего времени T , происходит откат на время T^* . Для

реализации отката необходимо восстановить состояние текущего ЛП на момент времени T . А также отменить сообщения, разосланные другим логическим процессам. Для этого используется механизм «антисообщений»: для каждого обработанного сообщения хранится противоположное. Для отмены сообщения посылается соответствующая «антикопия». При получении антисообщения процесс либо удаляет положительное сообщение из очереди, если оно не было еще обработано, либо также производит откат до времени антисообщения.

Оптимизация алгоритмов синхронизации

Рассмотренные выше базовые алгоритмы имеют серьезные недостатки: алгоритм «нулевых сообщений» генерирует огромное количество пустых сообщений, а также сильно ограничивает параллельное выполнение процессов. Time Warp – напротив, никак не ограничивает выполнение симуляторов, что приводит к большому количеству откатов, которые сигнализируют о значительных тратах вычислительных ресурсов впустую. Модельное время из-за откатов так же движется медленно. В настоящее время существует большое количество работ по оптимизации распределенных АС.

Алгоритм нулевых сообщений оптимизируется различными путями, рассмотрим основные из них:

1. Оптимизация количества посылаемых нулевых сообщений [10]:

- а) по запросу для расширения горизонта;
- б) при возникновении тупика

2. Расширение временного горизонта за счет использования:

- а) параметра, называемого LookAhead [11]. В этом случае, процесс гарантирует, что после отправки сообщения с временной меткой T , следующее сообщение будет не ранее, чем через LookAhead единиц времени. Далее возможна более тонкая оптимизация за счет различных LookAhead для разных связей между логическими процессами. В основном предполагается, что данный параметр будет задаваться вручную, однако есть работы по его автоматическому вычислению [12].

- б) информации о временной метке следующего события. Это еще более тонкая оптимизация, чем LookAhead, однако требуется специальный способ описания модели, в общем случае мы не можем получить точную информацию о временной метке будущего события.

Для Time Warp так же существуют способы оптимизации. В основном они борются с чрезвычайным забеганием вперед времени логических процессов, для этого вычисляется нижняя временная метка всех логических процессов (GVT), ниже которой откат произойти не может, а далее используются следующие методы:

1. «Временное окно» – это параметр T , ограничивающий продвижение времени в промежутке от $[GVT, GVT+T]$. Временное окно может задаваться жестко, а может вычисляться автоматически, с помощью генетических алгоритмов [13], техники машинного обучения [14] или по другим методикам. Такие методы хороши для моделей, в которых допустимая разница между временем логических процессов фиксирована, тогда за сравнительно короткий промежуток времени находится его оптимальное значение, и далее модель функционирует эффективно. Однако разница может варьироваться в процессе выполнения модели, и данный алгоритм показывает слабые результаты.

2. Использование LookBack [15]. Методика очень похожа на консервативный алгоритм с LookAhead и служит для того, чтобы избежать глобальных откатов (откатов, затрагивающих несколько локальных процессов). Если текущее время ЛП- T , то (T -LookBack) это – время, за которое процесс может выполнить исключительно локальный откат, таким образом, если ограничивать продвижение времени с помощью LookBack, можно избежать глобальных откатов, что значительно экономит ресурсы

вычислительных узлов, однако, сильно ограничивает продвижение времени, приближая алгоритм к консервативному.

3. Посылка сообщений между ЛП, только в том случае, если гарантируется, что они не будут аннулированы в случае отката. Данный алгоритм напоминает LookBack, но накладывает еще более жесткие условия на продвижение времени в модели.

Мы проанализировали лишь основные направления оптимизации алгоритмов, исключив технические усовершенствования, такие как выполнение вспомогательных вычислений на отдельных узлах, оптимизация хранения состояния модели, или использование обратных вычислений для восстановления состояния. Идеальный алгоритм должен максимально использовать параллелизм модели, при этом не выполняя лишних вычислений (вычисления не должны откатываться, а расходы на реализацию алгоритма должны быть минимальны). Большинство алгоритмов для достижения этой цели использует вспомогательные параметры (LookAhead, LookBack, временное окно), которые представляют собой неявную информацию, заложенную внутри модели, причем заметна тенденция увеличения эффективности алгоритма с увеличением количества используемой информации о модели.

Алгоритм, использующий информацию о модели

Проанализированные АС в основном используют зависимость процессов по времени, хотя на самом деле такая зависимость может варьироваться. Рассмотрим пример: пусть имеются 2 кассы, продающие билеты на один поезд. Поток клиентов к первой кассе приходит раз в 15 ± 30 мин, клиенты ко второй кассе приходят раз в 60 ± 15 мин. Пусть при некотором прогоне получилась такая последовательность: 1, 25, 40, 120; 2, 66, 135, 200. Оба процесса выполняются с одинаковой скоростью, однако модельное время движется по-разному. Если рассматривать зависимость по времени, то получается, что временное расстояние изменяется, что затрудняет подсчет, например, корректного временного окна. Однако если рассмотреть суть зависимости, то видно, что вторая очередь должна генерировать событие только после первой, т.е. налицо зависимость между событиями.

В сущности, результат моделирования представляет собой последовательность изменения состояний, связанную с последовательностью обработки событий. Проблема алгоритма на каждом шаге – определить, является ли обработка следующего локального события безопасной, т.е. гарантия отсутствия отката. Сама природа модели содержит не только зависимости между объектами по времени, которую традиционно используют алгоритмы, но и зависимость (событие, состояние) $\rightarrow$ событие.

Если заранее иметь полное множество зависимостей между состояниями и событиями модели во времени, то принимать решение об обработке очень легко, нужно лишь сверить текущее состояние системы с нужным состоянием из множества – если оно ему соответствует, то событие можно обработать, иначе приостановить выполнение до получения соответствия. Однако, построение такого множества зависимостей – это и есть процесс моделирования, поэтому мы не можем получить его заранее. Можно лишь анализировать текущую накопленную последовательность (в рамках одного прогона) или результаты предыдущих выполнений системы. Также к построению зависимостей можно привлекать эксперта, создающего модель. Эти зависимости являются причинно-следственными, т.е. $A \rightarrow B$. Так как такая связь может быть не строгой, а зависеть от генерации случайных величин во время прогона, или в случае задания экспертом может содержать неточность или нечеткость, поэтому необходимо использовать понятие доверия к зависимости.

Адекватное представление такой информации о модели дает продукционная парадигма, кроме того, в качестве дополнительного плюса ее использования можно отметить понятность и наглядность ее для пользователя.

Мы не можем целиком полагаться на знания пользователя, так как в основном явные знания уже запрограммированы в модели, а неявные сложно извлекать, поэтому необходимо уметь генерировать продукционные правила автоматически: в ходе статического анализа кода модели перед выполнением, а так же в ходе выполнения: при откатах создавать правила, предотвращающие появление откатов в будущем. Если мы обработали событие покупки билета вторым клиентом (E2), а затем произошел откат из-за события покупки билета первым клиентом (E1), в системе генерируется связь (E1→E2). Разработанный алгоритм авторы назвали TriadRule. Подробно теоретические основы и практическая реализация изложены в работе [16].

Эксперименты с алгоритмом TriadRule

Выше описанный подход использован для реализации синхронизации распределенной системы Triad.NET[16]. Алгоритм в данный момент оптимизируется, но уже получены некоторые результаты. Моделирование проводилось на кластере с использованием нескольких простых моделей. Для сравнения производительности были выбраны классический консервативный и оптимистический алгоритмы. Наиболее показательные результаты были получены на модели вычислителя ILLIAC (рис. 1).

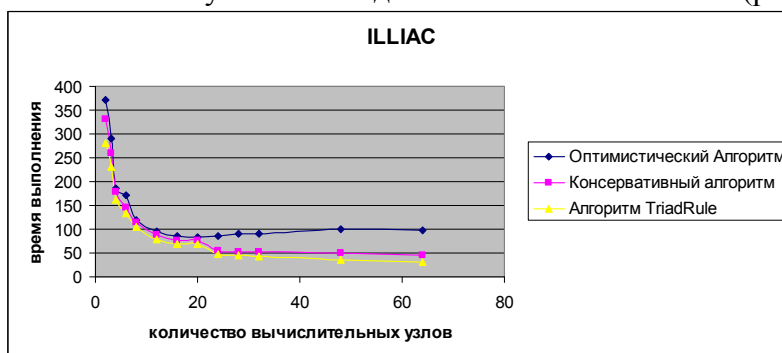


Рис. 1. Эксперименты с моделью ILLIAC

По графику (рис. 2) видно, что алгоритм показывает лучшую производительность, чем оба алгоритма традиционных алгоритма, причем, что важно, при увеличении количества вычислительных узлов, разница становится более заметна. Происходит это потому, что растет количество логических процессов, и, следовательно, и общее количество внешних связей в системе, что для консервативного алгоритма приводит к уменьшению быстродействия, т.к. временной горизонт продвижения становится меньше, а для оптимистического приводит к увеличению количества откатов.

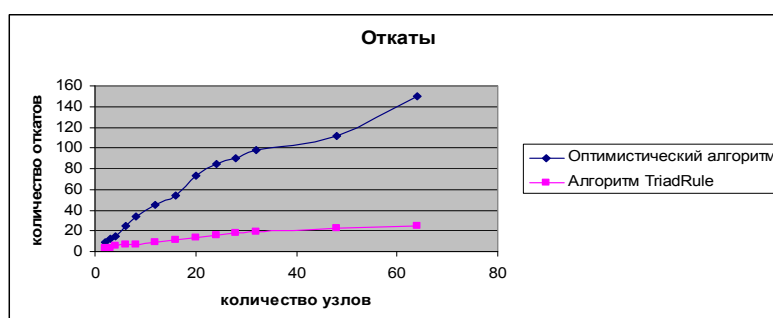


Рис. 2 Сравнение количества откатов

Выводы

Для реализации эффективных алгоритмов синхронизации необходимо извлечение максимальных знаний о модели. Традиционно используются знания только о временных зависимостях между логическими процессами, при этом теряется информация о зависимости событий и состояний между собой. Авторы предложили подход, позволяющий учесть причинно-следственные связи для продвижения времени. Чтобы достичь оптимальности, нужно скомбинировать эти подходы, а также можно задействовать средства анализа результатов моделирования, например Data-Mining, с целью выявления более скрытых зависимостей.

Литература

1. **Bhatt S.** Parallel Simulation Techniques for Large-Scale Networks. // IEEE Communications, 1998. 36(8). P. 42–47.
2. **Steinman J. S.** SPEEDES: A Multiple-Synchronization Environment for Parallel // Discrete Event Simulation. International Journal on Computer Simulation, 1992. P. 251–286.
3. **Unger B.** Scheduling Critical Channels in Conservative Parallel Discrete Event Simulation // Proceedings of the Workshop on Parallel and Distributed Simulation, 1999.
4. **Окольнішников В. В.** Разработка системы распределенного имитационного моделирования для различных операционных сред // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД 2005), Санкт-Петербург, 2005. Т. 1. С. 256–260.
5. **Грибов Д. И., Смелянский Р. Л.** Комплексное моделирование бортового оборудования летательного аппарата // Труды конференции «Методы и средства обработки информации», МСО-2005. М., 2005. С. 59–76.
6. **Феокистов А. Г.** Организация распределенного имитационного моделирования в GRID-системе // Параллельные вычислительные технологии: Тр. I Междунар. науч.-практ. конф. Челябинск, 2007. Т. 2. С. 28–36.
7. **Диденко Д. Г.** От последовательного моделирования в системе GPSS/World к распределённому моделированию в OpenGPSS. // Имитационное моделирование. Т. 1. Теория и практика (ИММОД 2009). СПб.: 2009. С. 251–256.
8. **Chandy K. M., Misra J.** “Distributed Simulation: A Case Study in Design and Verification of Distributed Programs.” IEEE Transactions on Software Engineering, 1978 SE-5(5). P.440–452.
9. **Jefferson D., Sowizral H.** Fast Concurrent Simulation Using the Time Warp Mechanism, Part I: Local Control // Rand Note N-1906AF, Rand Corp., California, 1982.
10. **Rizvi S. S., Elleithy K. M., Riasat A.** Minimizing the null message exchange in conservative distributed simulation // Proceedings of International Joint Conferences on Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering, 2006.
11. **Fujimoto R. M.** Lookahead in parallel discrete event simulation // Proceedings of the 1988 International Conference on Parallel Processing, 1988. P. 34–41.
12. **Zarei Behrouz, Pidd Michael.** Performance analysis of automatic lookahead generation by control flow graph: some experiments // Simul. Pr. Theory, 2001. P.511–527.
13. **Wang J., Tropper C.** Using Genetic Algorithms to Limit the Optimism in Time Warp // Winter Simulation Conference (WSC), Austin, Texas, December 13-December 16, 2009.
14. **Meraji Sina, Tropper Carl.** A Multi-State Q-learning Approach for the Dynamic Load Balancing of Time Warp // Workshop on Advanced and Distributed Simulation (PADS’10), May 16-May 19, Atlanta, Ga, 2010.
15. **Chen G., Szymanski B.K.** Lookback: a new way of exploiting parallelism in discrete event simulation // Proc. of the 16th Workshop on PDES, 2002. P. 153–162.
16. **Замятина Е. Б., Ермаков С. А.** Алгоритм синхронизации объектов распределенной имитационной моделт в Triad.Net // ITHEA, Болгария, 2011. С. 211–221.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ БУФЕРОВ ФРАКТАЛЬНЫХ СМО**В. Н. Задорожный (Омск), О. И. Кутузов (Санкт-Петербург)****Введение**

Основной особенностью трафика современных телекоммуникационных сетей с коммутацией пакетов является его масштабная инвариантность (фрактальность), оказывающая существенное влияние на качество связи [1–3]. Исследования трафика концентрируются вокруг статистических характеристик очередей, поскольку буферизация сообщений рассматривается как основная обеспечивающая ресурсами стратегия. Эта область исследований характеризуется в [3] следующим образом: «В 1993 г. сенсацией в области моделирования характеристик сетей стал доклад, представленный специалистами из компании BellCore и Бостонского университета ... Этот доклад под названием "О фрактальной природе трафика в Ethernet", по мнению некоторых специалистов, явился наиболее значительной работой по вычислительным сетям за последние десять лет ... Результаты нового взгляда на природу сетевого трафика... означают, например, что целая область проектирования компьютерных устройств – построение буферов и управление ими – нуждается в радикальном пересмотре... Однако среди специалистов пока нет единого мнения о том, какие математические инструменты применимы и эффективны для его исследования и прогнозирования. Их разработка должна стать следующим важным шагом в этой области».

Фрактальные, т.е. степенные или асимптотически-степенные [4] распределения – это распределения с тяжелыми хвостами (РТХ). В книге [5] в числе перспективных моделей теории массового обслуживания упоминаются «модели с "тяжелыми хвостами" распределений, характеризующих входящий поток и процесс обслуживания».

В докладе рассматриваются специфические проблемы имитационного моделирования (ИМ) фрактальных сетей массового обслуживания (СМО) и предлагается усовершенствованный метод расчета их буферов.

Проблема корректной реализации фрактальных распределений

При ИМ реализация фрактальных распределений сопряжена со специфическими трудностями вычислительного характера. Поясним их на примере распределения Парето $Pa(K, \alpha)$, описываемого плотностью вероятностей (п.в.):

$$f(t) = \frac{\alpha K^\alpha}{t^{\alpha+1}}, \quad \alpha > 0, \quad t \geq K, \quad (1)$$

где α – параметр формы, $K > 0$ – минимум случайной величины x (масштабный параметр). Соответствующая функция распределения (ф.р.) имеет вид:

$$F(t) = 1 - (K/t)^\alpha, \quad t \geq K. \quad (2)$$

С учетом (1) k -й начальный момент распределения Парето (РП) выражается в виде:

$$M(x^k) = \int_K^\infty t^k f(t) dt = \begin{cases} \frac{\alpha K^k}{\alpha - k}, & \alpha > k, \\ \infty, & \alpha \leq k, \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots). \quad (3)$$

Отсюда при $\alpha > 1$ находим конечное среднее (м.о.) $M(x) = \alpha K / (\alpha - 1)$, при $\alpha > 2$ – конечную дисперсию $D(x) = M(x^2) - M^2(x) = \alpha K^2 / (\alpha - 1)^2 / (\alpha - 2)$.

Сгенерируем на GPSS посредством функции $\text{Pareto}(1, 1, 1.1)$ 100 млн. независимых значений случайной величины (сл.в.) $x \in \text{Pa}(K, \alpha)$ при $K = 1$, $\alpha = 1.1$ и вычислим статистические оценки M^* и σ^* для м.о. $M(x)$ и среднеквадратичного отклонения σ_x . Согласно (3) $M(x) = 11$ и $\sigma_x = \infty$. Но получаемые оценки $M^* \approx 7.5$ и $\sigma^* \approx 380$ сильно отличаются от приведенных точных значений. Заметим, что стократно более короткая выборка из 1 млн. значений экспоненциальной сл.в. дает оценки для ее среднего и дисперсии с тремя точными значащими цифрами. Причиной больших ошибок (не вполне очевидной) здесь является дискретизация представления непрерывной сл.в. x .

Действительно, для реализации сл.в. $x \in \text{Pa}(K, \alpha)$, обращая ф.р. (2), получаем формулу $x = K / \sqrt[\alpha]{1-z}$, или, проще, $x = K / \sqrt[\alpha]{z}$, где $z \in \text{R}(0, 1)$ – базовая сл.в., равномерно распределенная на отрезке $(0, 1)$. Так, в GPSS функция $\text{Pareto}(1, 1, 1.1)$ вычисляет и возвращает число $(1/((\text{Uniform}(1, 0, 1))^{(1/1.1)}))$ (если на выходе датчика Uniform появляется нуль, он функцией пропускается). Степень дискретизации сл.в. $x \in \text{Pa}(K, \alpha)$ определяется шагом ε дискретизации сл.в. z в датчике $\text{Uniform}(1, 0, 1)$. Этот шаг составляет 0.000001, и $\text{Uniform}(1, 0, 1)$ выдает значения $z_i \in \{0.000000, 0.000001, 0.000002, \dots, 0.999999\}$, выбираемые случайно и равновероятно. В результате функция $\text{Pareto}(1, 1, 1.1)$ вместо непрерывной сл.в. $x \in \text{Pa}(K, \alpha)$ при $K = 1$, $\alpha = 1.1$ реализует некоторую дискретную сл.в. y с параметрами:

$$M(y) = \sum_{i=1}^{999999} p_i y_i = \frac{1}{999999} \sum_{i=1}^{999999} \frac{K}{\sqrt[\alpha]{z_i}} \approx \frac{1}{10^6} \sum_{i=1}^{10^6} \frac{1}{\sqrt[1.1]{10^{-6}i}} = \varepsilon \sum_{i=1}^{1/\varepsilon} \frac{1}{\sqrt[1.1]{\varepsilon \cdot i}} = 8.0296,$$

$$D(y) \approx \varepsilon \sum_{i=1}^{1/\varepsilon} \left[\frac{1}{\sqrt[1.1]{\varepsilon \cdot i}} \right]^2 - M^2(y) = 150449.7, \quad \sigma_y = \sqrt{D(y)} = 387.9. \quad (4)$$

К этим $M(y)$, σ_y и приближаются оценки $M^* \approx 7.5$, $\sigma^* \approx 380$ в описанном выше эксперименте с выборкой 100 млн. чисел из РП. В табл. 1 моменты сл.в. y , реализующей сл.в. $x \in \text{Pa}(K, \alpha)$ при $K = 1$, $\alpha = 1.1$, рассчитаны по формулам (4) для различных ε .

Таблица 1

Характеристики сл.в. y , реализующей сл.в. $x \in \text{Pa}(1, 1.1)$

ε	$M(y)$	$D(y)$	σ_y	$\Delta M = 11 - M(y)$
10^{-4}	6.485	3433.8	58.6	4.515
10^{-5}	7.338	22821.9	151.1	3.662
10^{-6}	8.030	150449.7	387.9	2.970
10^{-7}	8.591	990215.9	995.1	2.409
10^{-8}	9.046	6515370.2	2552.5	1.954

Из таблицы можно видеть, что $M(y)$ и σ_y с уменьшением ε приближаются к параметрам $M(x) = 11$ и $\sigma_x = \infty$. В GPSS можно обеспечить шаг $\varepsilon = 10^{-12}$, реализова сл.в. z выражением $(\text{Uniform}(1, 0, 1) + 1\text{E}-6 \# \text{Uniform}(1, 0, 1))$, которое возвращает равновероятные $z_i \in \{0.000000000000, 0.000000000001, \dots, 0.999999999999\}$, и даже шаг $\varepsilon = 10^{-15}$. Но более мелкий шаг превращается в «машинный нуль». Найдем наибольшее

ε , обеспечивающее «приемлемую» погрешность $\Delta M = 11 - M(y) = 0.001$. Для этого нужно продолжить расчеты в табл. 1 до значений $\varepsilon = 10^{-12}$, 10^{-15} и далее. Однако при таких значениях ε расчеты по формулам (4) становятся слишком трудоемкими. Расчет сумм для $10^{12} \div 10^{15}$ слагаемых требует от нескольких дней до нескольких лет машинного времени.

Выполним расчеты следующим образом. Часть зависимости $\Delta M(\varepsilon)$, представленная в табл. 1, отображается пятью точками графика, при логарифмическом масштабе шкал лежащими на идеальной прямой. Это свидетельствует о степенной (в рассматриваемом диапазоне) зависимости между ΔM и ε . Степенная аппроксимация

$$\Delta M(\varepsilon) = 10.433 \cdot \varepsilon^{0.0909} \quad (5)$$

при ее использовании для расчета пяти значений ΔM , представленных в табл. 1, характеризуется погрешностями, примерно равными единице их младшего разряда. По формуле (5) находим $\Delta M(10^{-12}) = 0.846$, и $\Delta M(10^{-15}) = 0.452$. Итак, ΔM при $\varepsilon = 10^{-12}$ и даже при $\varepsilon = 10^{-15}$ в сотни раз (!) превышает «приемлемую» погрешность. Используя (5), требуемое ε найдем из уравнения $\Delta M = 10.433 \varepsilon^{0.0909} = 0.001$. Решая это уравнение, определяем $\varepsilon \approx 6.21 \cdot 10^{-45} \approx 2^{-147}$. Отсюда видно, что дискретность вещественных чисел, представимых в обычной 32-разрядной машинной арифметике, не позволяет обеспечить «приемлемую» погрешность реализации сл.в. $x \in Pa(K, \alpha)$ при $K = 1$, $\alpha = 1.1$.

Таким образом, одной из первоочередных задач при ИМ фрактальных СМО, является задача корректной реализации фрактальных распределений.

Моделирование систем $M|Pa|1$, $Pa|M|1$ и фрактальных потоков

В позициях обозначений Кендалла будем РП указывать в виде Pa . При сопоставлении результатов ИМ систем $M|Pa|1$, $Pa|M|1$ и, особенно, систем $Pa|Pa|1$ с точным анализом их характеристик (там, где такой анализ возможен) обнаруживаются специфические проблемы, отсутствующие в «классическом» опыте ИМ СМО.

1. В системе $M|Pa|1$ при $K = 1$, $\alpha = 1.1$ и $\rho = 0.5$ ($\lambda = \rho/M(x) = 1/22$) средняя длина очереди $L = \infty$ (причем $L = \infty$ при любом $\rho > 0$, поскольку $M(x^2) = \infty$). При ИМ этой СМО на GPSS с обычным шагом дискретизации $\varepsilon = 10^{-6}$ оценка для ρ сходится приблизительно к 0.36 (не к истинному значению $\rho = 0.5$), а оценка для L – приблизительно к 250. Но при параметрах *реализованного* времени обслуживания y (табл. 1, см. строку $\varepsilon = 10^{-6}$), действительно, $\rho = \lambda M(y) \approx 0.36$, и (по формуле Хинчина) $L = 244.9 \approx 250$.

Если при $K = 1$ задать $\alpha = 2.1$ ($\rho = 0.5$, $\lambda = 11/42$, $L = 1.19$), то ИМ дает для ρ оценку 0.5 (верную), но для L – заниженную оценку 0.72. Оценка для L «выправляется» лишь при $\alpha > 3$. Занижение оценки для L – следствие занижения дисперсии сл.в. x .

2. В системе $Pa|M|1$ при бесконечной дисперсии длительности τ интервалов поступления средняя длина очереди L конечна (если $\rho < 1$). Сравнение результатов ИМ системы $Pa|M|1$ и точных (численных) решений приводится в табл. 2 (рассчитаной в [6]). Здесь $\tau \in Pa(1, \alpha)$. Уравнение для расчета L , включающее преобразование Лапласа-Стилтьеса от ф.р. (2), решается в [6] численным методом. При $\alpha = 1.1$ оценка $\rho_{\text{ИМ}}$ завышается пропорционально занижению $M(\tau)$, т.е. (см. табл. 1) в $11/8.03 = 1.36$ раза. Завышенная загрузка $\rho_{\text{ИМ}}$ при достаточно больших ρ влияет на оценку $L_{\text{ИМ}}$ сильнее, чем занижение (бесконечное) дисперсии сл.в. τ , и оценка $L_{\text{ИМ}}$ для L завышается. Критической загрузкой ρ , при которой $\rho_{\text{ИМ}} \rightarrow 1$ и $L_{\text{ИМ}} \rightarrow \infty$, является $\rho = 8.03/11 = 0.73$.

3. При суммировании N потоков с РП интервалов τ при $\alpha \leq 1$, т.е. с бесконечным (в ИМ – очень большим) м.о. $M(\tau)$, или при $1 \leq \alpha \leq 2$, т.е. только с бесконечной дисперсией $D(\tau)$, многие статистические характеристики суммарного потока (например, коэффициент вариации) с ростом N сближаются с характеристиками пуассоновского по-

тока. При этом график эмпирической ф.р. интервалов суммарного потока визуально хорошо совмещается с графиком экспоненциального распределения. Однако в имитационной модели при направлении суммарного потока на вход СМО с экспоненциальным временем обслуживания средняя длина очереди оказывается на порядки более высокой, чем в системе $M|M|1$, которая бы сформировалась, если бы суммарный входной поток был действительно пуассоновским. Таким образом, сумма фрактальных потоков в общем случае к пуассоновскому потоку не сходится. Случайное их прореживание – тоже: точные соотношения [7] показывают, что если первый (второй) момент прореживаемого потока бесконечен, то и первый (второй) момент прореженного – тоже бесконечен.

Таблица 2

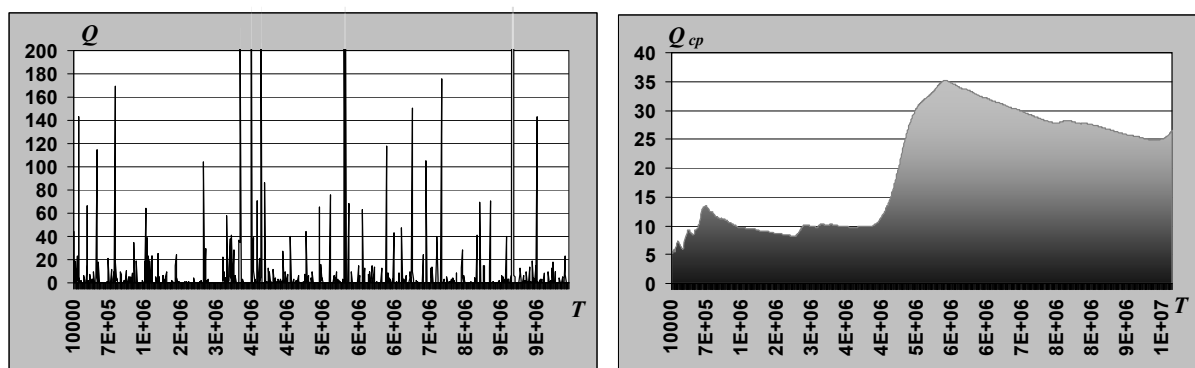
Сравнение оценок $\rho_{\text{им}}$ и $L_{\text{им}}$ с точными значениями ρ и L

ρ	$\alpha = 2.1, M(\tau) = 1.90909$			$\alpha = 1.1, M(\tau) = 11$		
	$\rho_{\text{им}}$	L	$L_{\text{им}}$	$\rho_{\text{им}}$	L	$L_{\text{им}}$
0.1	0.100	0.0001	0.0001	0.136	0.035	0.047
0.2	0.200	0.0067	0.007	0.275	0.369	0.505
0.3	0.300	0.0364	0.036	0.402	2.037	2.733
0.4	0.400	0.1106	0.111	0.532	10.75	14.409
0.5	0.500	0.2635	0.264	0.673	49.81	98.139
0.6	0.600	0.5640	0.564	0.831	251.2	859.316

Система $\text{Pa}|\text{Pa}|1$

Типовая модель узла сети с фрактальным трафиком – это СМО с фрактальными распределениями, характеризующими как входящий поток, так и процесс обслуживания, имеющая $n \geq 1$ каналов, – например, СМО типа $\text{Pa}|\text{Pa}|n|k$. Специфику моделирования таких СМО можно показать на примере системы $\text{Pa}|\text{Pa}|1$ с интервалами поступления $\tau \in \text{Pa}(1, 1.1)$ и временем обслуживания $x \in \text{Pa}(1, 1.5)$.

На рис. 1 слева показано изменение длины Q очереди в этой СМО. Значения Q , взятые в точках $t = 10$ тыс., 20 тыс., ..., получены путем ИМ, при шаге дискретизации $\varepsilon = 10^{-12}$. Справа на рисунке для тех же t представлен процесс $Q_{\text{cp}}(t)$, полученный усреднением 50 независимых траекторий оценки для L (атрибута QAj в GPSS). Очевидным является резкое отличие этих характеристик системы $\text{Pa}|\text{Pa}|1$ от характеристик классических СМО типа $M|M|1$. Заметим, что в моделируемой СМО $\text{Pa}|\text{Pa}|1$ $\rho = 0.3$.

Рис. 1. Изменение длины Q очереди фрактальной СМО и оценки Q_{cp}

Ускоренный метод расчета буферов фрактальных СМО

Расчет буфера фрактальной СМО, гарантирующего малую вероятность P потери заявки (например, $P \leq 10^{-8}$), требует при непосредственном ИМ неприемлемо высоких затрат времени, обусловленных необходимостью оценивать малую вероятность P при большой дисперсии длины очереди и длительных переходных процессах в системе.

Предлагаемый аналитико-имитационный подход является модификацией метода экстремальных статистик [8]. При малых P число отказов N_0 , которые произойдут за время данного периода непрерывной занятости (ПНЗ) системы с бесконечным буфером, если его заменить буфером объема m , можно определять по формуле

$$N_0 = \max\{Q_{\max} - m, 0\},$$

где $Q_{\max}$ – максимальная длина очереди, достигаемая на этом ПНЗ при бесконечном буфере [8]. Формула позволяет по одному прогону модели с достаточно большим числом ПНЗ рассчитать общее число отказов сразу для многих значений m и получить соответствующие оценки $P = P(m)$ (рис. 2), сокращая тем самым время ИМ на два-три порядка. За пару секунд моделирования системы Pa|Pa|1 (из предыдущего раздела) формируется набор данных, позволяющий построить аппроксимацию зависимости $P(m)$. Так, на рис. 2 построены экспоненциальная (слева) и степенная аппроксимации.

В целом выясняется, что для фрактальных СМО степенные аппроксимации зависимости $P(m)$ весьма точны. Для упомянутой СМО Pa|Pa|1 экспоненциальный прогноз вероятности P на точку $m = 700$ дает $P^* = 1.1 \cdot 10^{-8}$, степенной – $P^* = 0.0022$, ИМ (при прогоне 1 млн. заявок) при $m = 700$ дает $P^* = 0.0024$. Возможно, для фрактальных СМО асимптотика $P(m)$ при $m \rightarrow \infty$ действительно степенная (заметим, что в системе M|M|n| m зависимость $P(m)$ асимптотически экспоненциальная). Из степенного уравнения $P = 0.5462m^{-0.8468}$ (рис. 2 справа) находим $m(P) = \exp(\ln(0.5462/P)/0.8468)$. Отсюда требуемый для $P = 10^{-8}$ объем буфера $m = \exp(\ln(0.5462 \cdot 10^8)/0.8468) = 1.4 \cdot 10^9$.

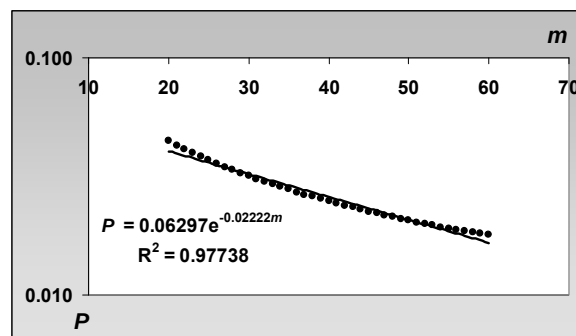


Рис. 2. Построение для $P(m)$ экспоненциального (слева) и степенного уравнений регрессии (шкалы P логарифмические; шкала m справа также логарифмическая; маркеры – данные ИМ)

Заключение

Предложенный подход к расчету буферов для узлов сетей с фрактальным трафиком позволяет определять размеры буферов с достаточной точностью, сокращая время ИМ на несколько порядков. Изложенные результаты позволяют применять этот подход к многоканальным СМО и исследовать эффекты суммирования/прореживания фрактальных потоков (в контексте задач буферизации), учитывая проблемы реализации фрактальных распределений. Эксперименты показывают, что зависимость вероятности P потери заявки от размера m буфера фрактальной СМО при $m \rightarrow \infty$ близка к степенной. Актуальна задача формального асимптотического анализа этой зависимости.

Литература

1. **Шелухин О. И., Тенякшев А. М., Осин А. В.** Фрактальные процессы в телекоммуникациях. / Под ред. О. И. Шелухина. М.: Радиотехника, 2003. 480 с.
2. **Столлинс В.** Современные компьютерные сети. СПб.: Питер, 2003. 784 с.
3. **William Stallings.** Интернет и телекоммуникации. URL: http://my.online.ru/it/press/cwm/19_97/world.htm (Дата обращения: 13.03.2010).
4. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
5. **Вишневский В. М.** Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.
6. **Задорожный В. Н.** Аналитико-имитационные исследования Больших Сетевых Структур / В. Н. Задорожный. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 208 с.
7. **Рыжиков Ю. И.** Компьютерное моделирование систем с очередями: курс лекций. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. 164 с.
8. **Кутузов О. И., Задорожный В. Н., Олзоева С. И.** Имитационное моделирование сетей массового обслуживания: Учеб. пособие. Улан-Удэ: изд-во ВСГТУ, 2001. 228 с.

**О МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НА ПРИМЕРЕ
ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНКУРЕНЦИИ ДВУХ ФИРМ****В. В. Киндинова, Е. В. Кузнецова (Москва)**

Одним из способов построения сложных моделей в математическом моделировании является поэтапное построение, когда за начальную основу берется базовая модель, а дальше в результате поэтапного усложнения на каждом шаге получается новая модель, входящая в множество иерархических моделей увеличивающейся сложности [1]. Базовая модель – это математическая модель, основные свойства которой можно сформулировать точно в виде теорем, полученных строгими аналитическими методами.

Идея постепенного наращивания сложности, построения иерархии «вложенных» друг в друга математических моделей различной степени сложности высказывалась ранее. И. А. Полетаев писал: «Последовательное усложнение и наращивание моделей, составленных из уже изученных звеньев, позволит выделить и классифицировать типичные ситуации и даст в итоге прочную основу для суждений и прогнозов в практически важных задачах» [1, с. 350].

В работе исследуется применение «принципа минимального угла зрения» [5, 6] для построения имитационной модели (ИМ) рынка дуополии [2]. Интерес к такому принципу построения сложных моделей объясняется тем, что существует достаточно примеров, иллюстрирующих эффективность построения иерархии моделей как метода познания сложных систем. Например, современная физика – это логически связанная система математических моделей. Новые модели, т.е. новые теории, не отвергали старые, а включали их как некоторый частный случай, например модели Навье–Стокса включали в себя, в частности, модель Эйлера. Биофизика – не описательная наука, одна из главных её идей – проникновение в сущность явлений путём построения иерархии математических моделей, выявляющих закономерности процессов, протекающих в живых системах. Иерархия моделей использовалась в работах А. Д. Базыкина и его сотрудников при исследовании экосистемы двух трофических уровней методом развёртывания иерархической сети упрощённых математических моделей [4].

Используя принцип минимального угла зрения, «при моделировании конкретного объекта следует начинать его рассмотрение с возможно более далёкого расстояния (с минимальным углом зрения), на котором ещё остаётся различимым лишь тот минимум свойств объекта, без учёта которого рассмотрение теряет смысл. Затем, осуществляя постепенное приближение к объекту, нужно увеличивать угол зрения, останавливаясь и разрабатывая новые модели объекта всякий раз, когда становятся различимыми более мелкие свойства или структуры объекта. Естественно, что учёт более тонкой структуры объекта даёт возможность получить более “богатую” модель, которая, однако, включает в себя особенности поведения модели меньшего угла зрения. Следовательно, создаваемый при таком постепенном приближении к объекту ряд моделей должен обладать свойством соответствия, т.е. набор свойств модели меньшего угла зрения должен вкладываться в набор свойств модели любого из больших углов зрения» [1, с. 349–350]. При таком подходе модель минимального угла зрения является базовой для построения более детальных моделей конкретной сложной системы.

ИМ для анализа конкуренции двух фирм была разработана с использованием подхода системной динамики в среде моделирования AnyLogic. Разработанной потоковой диаграмме в среде AnyLogic соответствует аналитическое представление в виде системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) первого порядка. Представленная ИМ является развитием модели рынка дуополии, описанной в работе [2].

На начальном этапе разработки ИМ модели за базовую модель была принята модель Ф. Басса [8], математическая форма которой имеет вид нелинейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dN}{dt} = (a + bN)(M - N)$$

с начальным условием

$$N(0) = N_0.$$

N является функцией времени и представляет число (или долю) владельцев продукта. Значение N_0 описывает число (или долю) пользователей нововведения в тот начальный момент времени, начиная с которого исследователь считает модель пригодной для описания явления. Величина M отражает долговременный потенциал рынка. Параметры a и b характеризуют интенсивность “внешнего” и “внутреннего” воздействия, соответственно. Параметр внешнего воздействия описывает влияние рекламы на рост числа потребителей продукта. Параметр внутреннего воздействия характеризует скорость распространения информации в ходе межличностных отношений.

Ограничения модели Басса:

- создавалась для реально новых категорий продуктов;
- имеет бинарную структуру принятия решения о покупке;
- в модель не включались повторные покупки;
- не учитывались изменения параметров a и b во времени и под воздействием внешней среды;
- агрегированные данные продаж не связаны с индивидуальным потребительским поведением;
- не учитывалось появление замещающих продуктовых категорий.

В результате поэтапного усложнения базовой модели была получена ИМ для анализа конкуренции двух фирм, позволяющая исследовать причины возникновения лавин и циклов запаздывания. ИМ учитывает возможность совершения повторных покупок и изменения потенциала рынка. Структура базовой модели во многом усложнилась за счет добавления блока конкуренции, описывающего процесс покупки товаров у фирмы-конкурента. Также структура базовой модели расширилась за счет добавления следующих переменных: цена на товар у фирмы и у фирмы-конкурента, конкурентная привлекательность товара фирмы, себестоимость товара фирмы и фирмы-конкурента, время производственного цикла, расходы на производство фирмы и фирмы-конкурента, время реакции на действия фирмы-конкурента. Аналитическое представление ИМ-система из девяти нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, где динамические переменные: $Y1$ – потери товара у фирмы-конкурента, $Y2$ – количество товара фирмы-конкурента, $Y3$ – потеря товара у фирмы, $Y4$ – количество товара фирмы, $Y5$ – прибыль фирмы-конкурента, $Y6$ – прибыль фирмы, $Y7$ – купившие товар у фирмы-конкурента, $Y8$ – купившие товар у фирмы (соответствует динамической переменной N базовой модели), $Y9$ – численность потенциальных покупателей (изменяющийся потенциал рынка, соответствует величине M базовой модели).

В ходе анализа системы ОДУ был выделен блок из двух уравнений, определяющих непосредственно конкуренцию, где в качестве исследуемых динамических переменных выступают количество потребителей, предпочитающих товар фирмы (динамическая переменная $Y8$), и количество потребителей, предпочитающих товар фирмы-конкурента (динамическая переменная $Y7$). Сходство уравнений, описывающих конкурентную борьбу фирм, и уравнений, используемых для моделирования кинетики популяций, позволяет применять к ним те же методы исследований, что и в [4]. При

фиксированных значениях параметров были проведены тестовые прогоны ИМ и на выходе были получены характеристики системы, которые были предопределены аналитическим методом. Также в ходе экспериментов был получен результат, совпадающий с выводом в работе [3], о том, что сосуществование конкурентов неустойчиво и возможно только если в борьбе используются методы, выходящие за рамки чисто рыночных отношений. Была проведена серия экспериментов по исследованию числа потребителей, предпочитающих товары той или иной фирмы в зависимости от цены на товар, от параметра эффективности рекламы, от частоты общения между покупателями, от времени реакции фирмы-конкурента. Экспериментально обнаружены и исследованы явления лавины и гистерезиса [2], полученные результаты согласуются с выводами экономистов. Hermann Simon утверждает, что для инициирования гистерезиса во времени должно совпасть несколько факторов, влияющих на спрос, это – ценовая стратегия фирмы, маркетинговая стратегия, потребительская взаимозависимость и реакция конкурентов на действия фирмы [9]. Результаты экспериментов также согласуются с результатами, полученными с помощью агентной модели монополистического рынка с дискретным выбором и сетевой структурой [10].

Ниже приведены результаты, полученные в ходе экспериментов над ИМ.

1. Исследуется изменение значения динамической переменной Y_8 от цены на товар и частоты общения между покупателями. При задании большого значения коэффициента частоты общения между покупателями количество покупателей, готовых купить товар за высокую цену, больше (рис. 1), нежели при небольшом коэффициенте частоты общения. В последнем случае спрос увеличивается только при значительном уменьшении цены на товар (рис. 2).

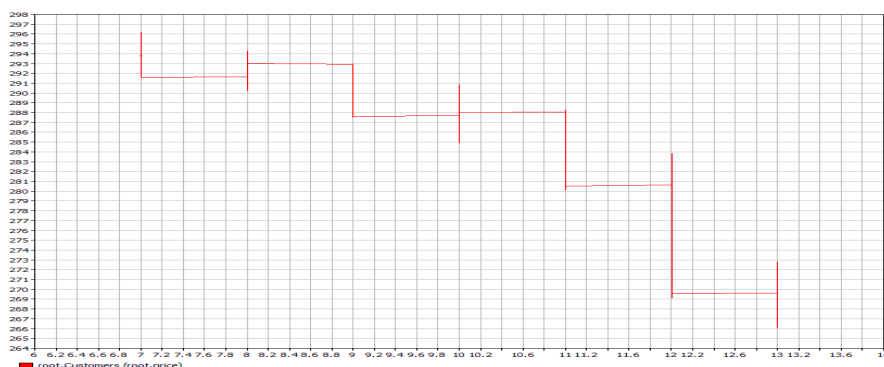


Рис. 1. Зависимость Y_8 от цены при частоте общения 150

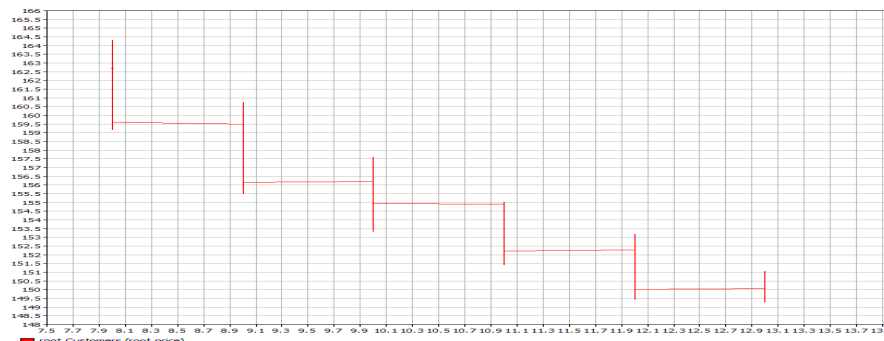


Рис. 2. Зависимость Y_8 от цены при частоте общения 50

2. Выявлен эффект “лавины”. Термин “лалина” ассоциируется с цепной реакцией, когда потребитель находится под непосредственным влиянием других потребителей и под косвенным влиянием изменяющейся цены. Экспериментально подтвердилось, чем больше связанность потребителей (частота общения), тем больше вероятность воз-

никновения лавины, причем не локальной, а глобальной. Рис. 3 – пример образования глобальной лавины, рис. 4 – возникновения локальных лавин в случае группового общения покупателей.

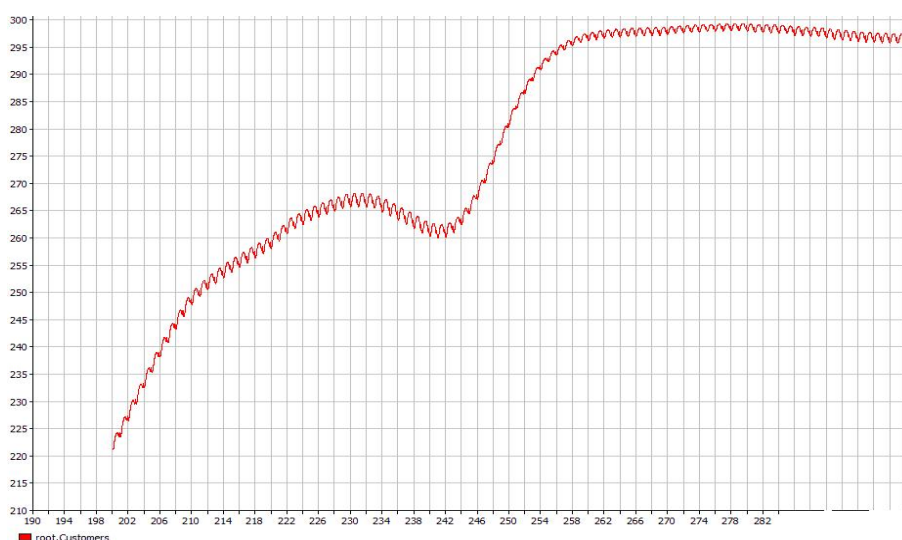


Рис. 3. Зависимость Y_8 от времени при заданной цене на товар и частоте общения 200

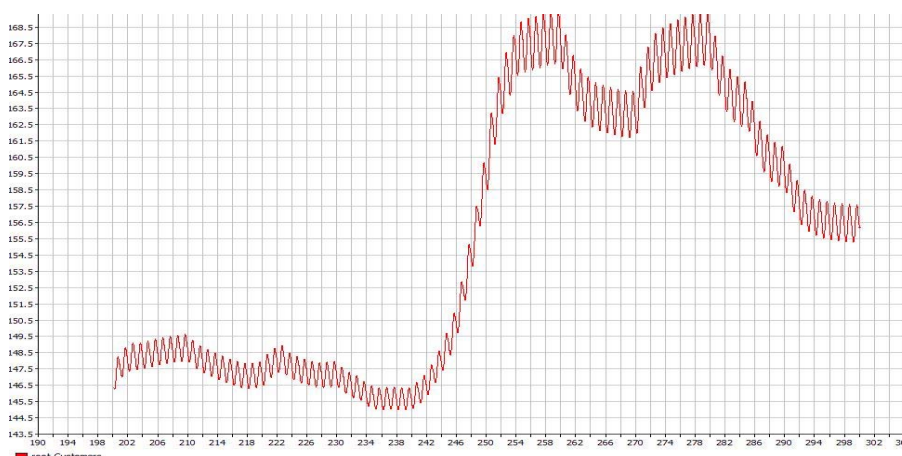


Рис. 4. Зависимость Y_8 от времени при заданной цене на товар и частоте общения 20

3. Эффект гистерезиса. Для заданной вариации цены были проведены наблюдения за изменением значения динамической переменной Y_8 , так как цена – это один из важнейших факторов возникновения гистерезиса. В рассматриваемой ситуации конкурент не реагирует на действие фирмы. Верхняя часть графика соответствует промежутку возрастания цены, нижняя часть графика – промежутку убывания. На графике рис. 5 коэффициент частоты общения больше чем на графике рис. 6. Видно, что разрыв между спросом (количество людей, купивших товар) при возрастании цены и спросом при убывании цены уменьшается при росте коэффициента частоты общения.

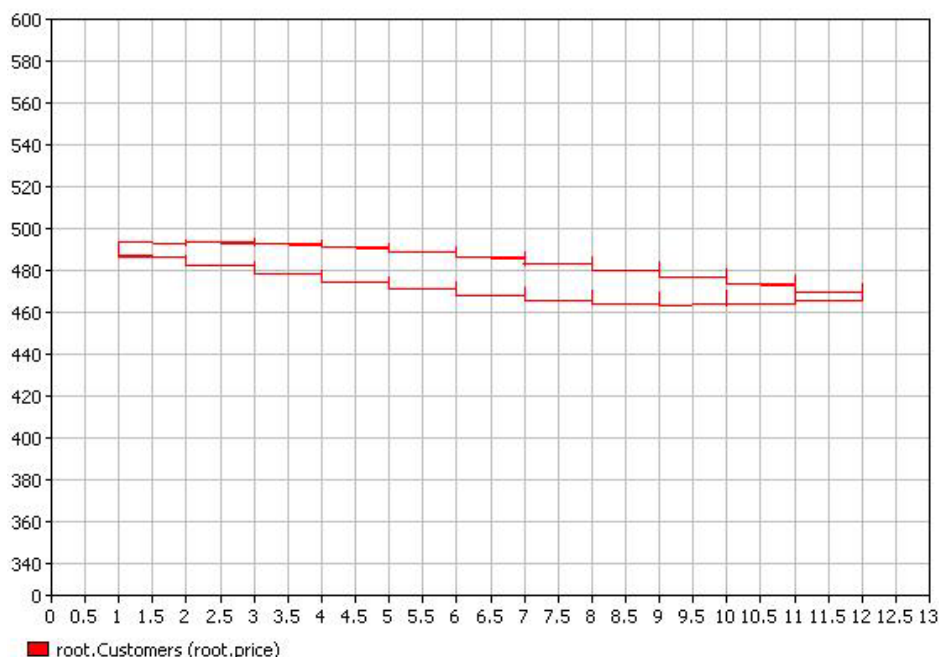


Рис. 5. Эффект гистерезиса при изменении цены и при частоте общения 150

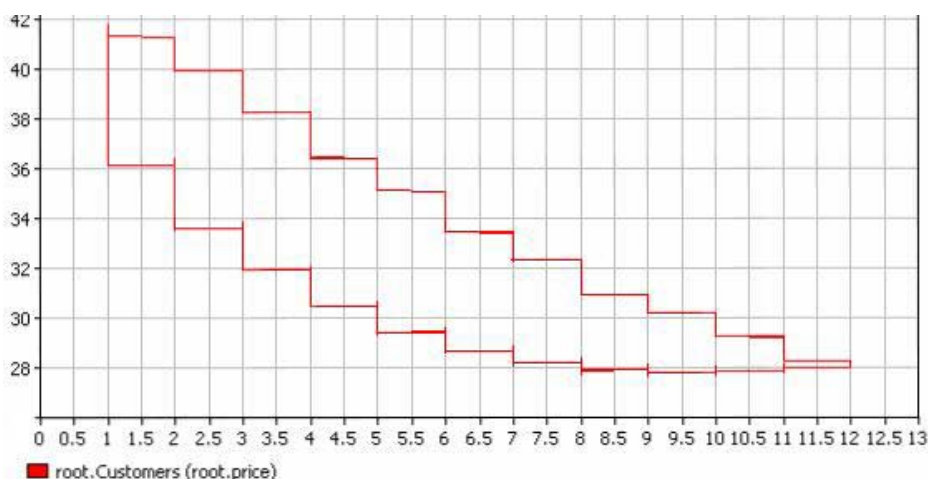


Рис. 6. Эффект гистерезиса при изменении цены и при частоте общения 50

На данном этапе исследовательской работы изучается вопрос оценки пригодности ИМ [7], ориентированных на исследование экономических процессов. Т. Нейлор и Дж. Фингер особо отмечали, что «проблема оценки пригодности является наиболее туманной из всех нерешенных проблем машинной имитации» [11, стр.153].

Внимание Т. Нейлора уделяется точке зрения К. Поппера, предложившего перенести внимание с вопроса о том, была ли установлена пригодность модели, на вопрос о степени ее экспериментального подтверждения. Предполагается, если в последовательности эмпирических испытаний модели не получено отрицательных результатов, а число положительных примеров постоянно увеличивается, то доверие к модели шаг за шагом растет. Опираясь в своем исследовании на точку зрения К. Поппера, было проведено эмпирическое тестирование ИМ: спланированы эксперименты над моделью и осуществлен сравнительный анализ полученных результатов.

Литература

1. Иерархия моделей математической биологии и численно-аналитические методы их исследования // Математическая биология и биоинформатика. 2007. Т. 2. № 2. С. 347–360.
2. **Киндинова В. В., Кузнецова Е. В.** Системная динамика в задачах имитационного моделирования рынка дуополии // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 7. С. 96–103.
3. **Зульпукаров М.-Г. М., Чернавский Д. С., Щербаков А. В.** <http://nonlin.ryxu/node/1198>.
4. **Базыкин А.Д.** Биофизика взаимодействующих популяций. М., Наука, 1985.
5. **Галицкий В. В.** О моделировании продукционного процесса в растительном сообществе. Моделирование биогеоценотических процессов. М.: Наука. 1981. 104–118.
6. **Галицкий В. В., Тюрюканов А. Н.** О методологических предпосылках моделирования в биогеоценологии // Моделирование биогеоценотических процессов. М.: Наука. 1981. С. 29–47.
7. **Румянцев М. И.** К вопросу оценки адекватности имитационных моделей банковских бизнес-процессов // Сб/ научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании». 2010. С. 84–93.
8. **Bass F. M.** A New Product Growth for Model Consumer Durables // Management Science. 1969. Vol. 15. P. 215–227.
9. **Hermann Simon.** Hysteresis in Marketing A New Phenomenon? Sloan Management Review / Spring 1997.
10. Модель “The Monopolist’s Market with Discrete Choices and Network Externality Revisited: Small-Worlds, Phase Transition and Avalanches in an ACE Framework” (Монополистический рынок с дискретным выбором и сетевой структурой): <http://perso.univ-rennes1.fr/denis.phan/papers/ppn2003.pdf>
11. **Нейлор Т.** Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем / Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 502 с.

**КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И
ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ПРИКЛАДНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ*****Н. П. Кириллов (Санкт-Петербург)**

Концептуальная модель – это описание свойств предметной области, совокупность которых позволяет упростить понимание присущих ей закономерностей, существенных для заданных целей применения. Построение концептуальной модели (КМ) процессов управления функциональными состояниями технической системы (ТС) [1] необходимо:

- ✓ для выявления и детализации причинно-следственных закономерностей, характеризующих эти процессы, с целью получения, систематизации и структуризации знаний о предметной области;

- ✓ для дефиниции онтологических понятий, применяемых при описании этих знаний, и установления семантических отношений между ними;

- ✓ для упрощения процедур построения моделей реальных ТС, за счет применения общесистемных методик моделирования, основанных на использовании КМ в качестве репрезентативной модели рассматриваемой предметной области.

В существующих КМ процессы управления представляются в виде контура, образованного между предварительно выделенными объектами – системой управления и ТС. При этом методы выделения этих объектов из среды, их границы и свойства не комментируются, а принимаются по умолчанию, как данность. Поэтому выявление и детализация свойств этих КМ можно осуществить только путем анализа конкретных ТС и систем управления. Однако полученная при этом дополнительная информация будет отражать только свойства выбранных объектов, а не общесистемные свойства всех объектов рассматриваемой предметной области. Кроме того такие КМ несостоятельны применительно к описанию процессов управления состояниями ТС, в которых имеются встроенные устройства и системы управления, изначально рассматриваемые в этих моделях отдельно от ТС.

Указанное обстоятельство обуславливает потребность в разработке принципиально другой КМ, лишенной этих недостатков. Такая КМ не должна зависеть от многообразия способов реализации процессов управления состояниями и специфики конструкции ТС. В основе такой модели должны использоваться только общесистемные свойства рассматриваемой предметной области. С другой стороны, эти свойства должны быть детализированы до уровня, на котором будут обеспечиваться возможности прикладного использования КМ. Противоречие в требованиях между универсальностью и конструктивностью КМ обуславливает суть проблемы построения таких моделей.

Для построения КМ предложен методологический подход, основанный на следующих положениях.

1. Для обеспечения независимости от специфики существующих и потенциально возможных методов и способов реализации рассматриваемых процессов КМ должна быть основана на описании функций, которые составляют системообразующее функциональное содержание этих процессов, и/или соответствующих им функциональных частей надсистемы, внутри которой реализуются процессы управления состояниями и функционирования ТС.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 11-08-00641-а и 10-08-90027-Бел_а.

2. Использование понятия «надсистема» позволяет решить задачу определения границ моделируемой предметной области – они, по определению, не выходят за границы надсистемы. В качестве такой надсистемы, выбрана мыслимая (гипотетическая) функциональная система – преобразователь (ПР).

Функциональная (кибернетическая) система (ФС) – по академику Анохину – это комплекс избирательно извлеченных компонентов некоторой ее надсистемы, взаимоотношения и взаимодействия которых ориентированы на получение фокусированного полезного результата [2]. Каждой ФС (функциональной части системы) соответствует полезная функция, описание которой рассматривается в качестве модели процессов функционирования этой системы (ее функциональной части).

3. Для исключения неопределенности в установлении границ модели ПР, предполагается, что:

- функция ПР состоит в преобразовании состояний его входа – «Объекта преобразования» (ОП) (аргументы функции) в состояния его выхода – «Результата преобразования» (РП) (значения функции);
- ПР – это ФС с автономным управлением, которая выполняет свою функцию в соответствии с собственными потребностями и целями;
- ПР взаимодействует со средой, в которой он находится, и потребляет некоторые виды ресурсов, обеспечивающие необходимые условия для его функционирования. Ресурсы и среда рассматриваются как объекты внешнего окружения ПР и его функциональных частей.

Предполагается также, что ПР имеет следующие свойства, присущие материальным объектам искусственного происхождения с управляемыми состояниями:

- функционирование ПР осуществляется на конечном этапе (времени жизни), на котором могут быть выбраны интервалы времени, в течение которых причинно-следственные процессы его поведения могут быть представлены моделями стационарной динамической системы;
- существуют условия штатной эксплуатации (сочетания состояний среды, ресурсов и интервалов времени жизни), в которых процессы функционирования ПР и его составных частей являются предопределенными и могут быть представлены в виде детерминированных моделей.

4. В составе ПР содержится мыслимый объект ТС – функциональная система, полезная функция которой заключается в обеспечении необходимых условий для выполнения целей функционирования ПР. Помимо способности выполнять свои полезные функции, ТС имеет следующие дополнительные системообразующие свойства [3]:

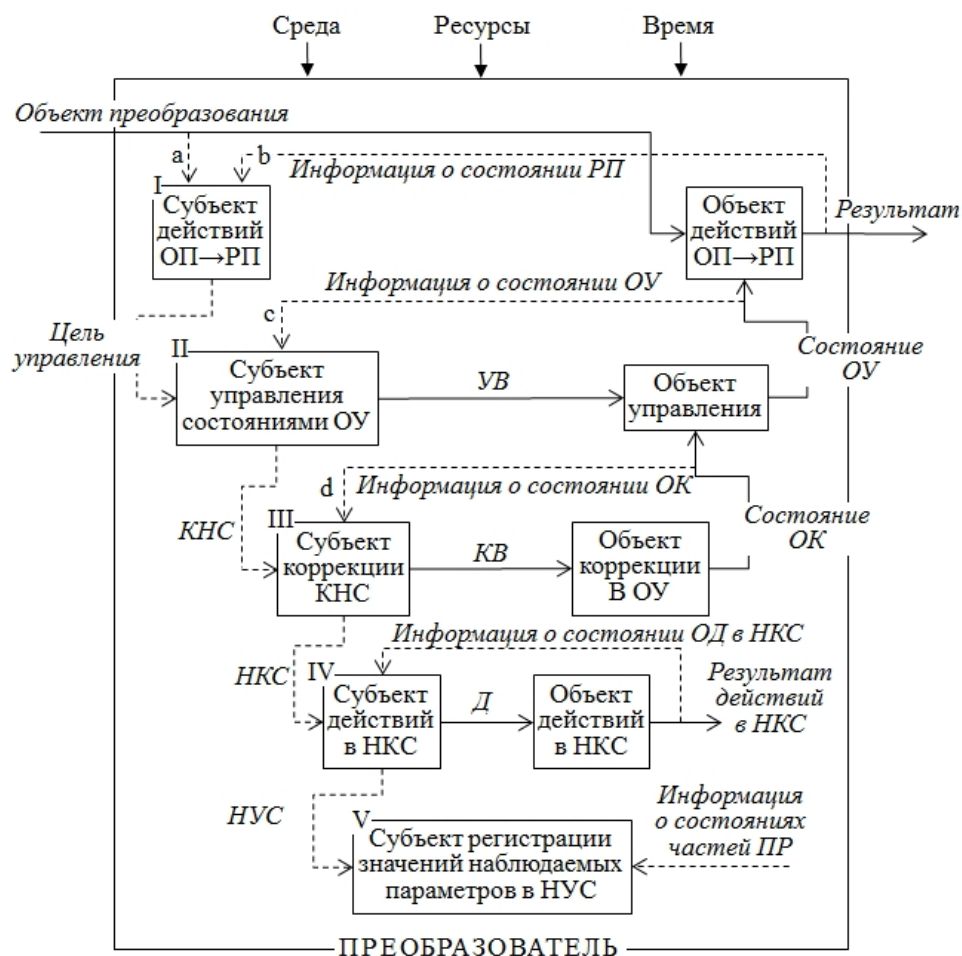
- причинность функционирования – свойство, которое характеризует способность системы изменять свои функциональные состояния только вследствие оказываемых на нее воздействий, в том числе и формируемых в самой системе в соответствии с предварительно заданными ей извне целями;
- автономность функционирования – свойство, характеризующее способность системы в штатных условиях эксплуатации самостоятельно выполнять свою полезную функцию в течение некоторого интервала времени в отсутствии управляющих воздействий, при ее нахождении в отдельных устойчивых и равновесных состояниях.

5. К объектам таксона «ТС» относятся материальные и мыслимые объекты, удовлетворяющие указанным выше свойствам ТС, следствием которых является наличие в них, по крайней мере, двух последовательно взаимодействующих между собой функциональных частей: сенсорной и исполнительной [3–6]. Функция сенсорной части (СЧ) состоит в восприятии управляющих воздействий (УВ) сигнального типа, поступающих от субъекта управления (СБУ) – одной из функциональных частей ПР, и изменении своего состояния в соответствии с этими УВ. Функция исполнительной час-

ти (ИЧ) состоит в изменении своих состояний в соответствии с изменениями состояний СЧ. Совокупность СЧ, ИЧ и связей между ними рассматривается как объект управления (ОУ), указанного выше СБУ, являющегося функциональной частью одновременно ПР и ТС.

6. Результаты каждого деятельного акта (ДА) ПР и его функциональных частей оцениваются по ситуациям, определяемым путем сравнения ожидаемого результата ДА до его инициации, и фактически полученного результата после его выполнения. При совпадении этих результатов ситуация определяется как штатная, в противном случае – как нештатная (НС). Возможны три типа НС: корректируемая (КНС), некорректируемая (НКС) и ситуация, при возникновении которой невозможно осуществлять управление состояниями ОУ (неуправляемая ситуация – НУС). Для каждого из перечисленных типов ситуаций, за исключением НУС, в ПР существует пара взаимодействующих между собой функциональных частей: субъект и объект действия (управления, коррекции). Субъект – функциональная часть ПР, выполняющая функции принятия решений в соответствующих ему ситуациях; объект – функциональная часть, исполняющая эти решения. При возникновении НУС в ПР осуществляется выполнение только функции регистрации значений всех наблюдаемых параметров, характеризующих функционирование всех функциональных частей ПР.

Объектно-ориентированная модель ПР, представленная в базисе его функциональных частей, показана на рисунке. При определении состава и структуры предлагаемой КМ использовались известные положения кибернетики и теории систем, ориентированные на анализ и описание функций, выполняемых в процессе управления состояниями объектов живой и неживой природы.



7. Состав функциональных частей ПР и их свойства рассматриваются как множество классификационных признаков процессов управления и функционирования реальных и мыслимых ТС. Выявление этих признаков позволяет разделить таксон ТС на подтаксоны, каждый из которых будет характеризоваться собственным набором идентифицирующих его признаков – подмножеством частей ПР. Системоопределяющим признаком таксона ТС является наличие у всех его объектов функциональной части ПР – ОУ. В этом таксоне существует минимальный по мощности подтаксон, содержащий единственный элемент, имеющий максимальный набор признаков, выделенных в КМ ПР, соответствующий ТС, выполняющей функции самого ПР.

В докладе рассматриваются и иллюстрируются методы и способы дальнейшей детализации свойств предложенной КМ ПР, а также варианты ее прикладного использования, в частности, на трудно формализуемых этапах формирования требований, предъявляемых к имитационным моделям процессов управления и функционирования ТС, построения концептуальных моделей, удовлетворяющих этим требованиям, решения задач верификации и валидации таких моделей, выполняемых в настоящее время с использованием эмпирических и эвристических методов.

Литература

1. **Кириллов Н. П.** Функциональное состояние технического объекта. Дефиниция понятия // Авиакосмическое приборостроение. 2010. № 10. С. 31–40.
2. **Анохин П. К.** Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем // Очерки по физиологии функциональных систем: Сб. статей. М., 1975. С. 17–62.
3. **Кириллов Н. П.** Признаки класса и определение понятия «технические системы» // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 8. С. 32–38.
4. **Кириллов Н. П.** Репрезентативная модель объекта управления технических систем (часть I) // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 10. С. 25–30.
5. **Кириллов Н. П.** Репрезентативная модель объекта управления технических систем (часть II) // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 10. С. 31–37.
6. **Кириллов Н. П.** Концептуальные модели и свойства технических систем с управляемыми состояниями (обзор и анализ) // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 4 (в печати).

УПРАВЛЯЮЩИЕ ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ

Н. Б. Кобелев (Москва)

Понятие «управление» в любой системе S – это целенаправленная деятельность с использованием определенного количества ресурса или энергии в форме обобщенной работы, которая осуществляется либо частью системы или другой системой для рационального выбора пути движения к определенной цели системы S .

Имитационные модели обычно не используются для управления какими-то объектами, а воспроизводят сам процесс-оригинал объекта во времени и с сохранением его логической структуры, т.е. этот тип моделирования близок к натурному эксперименту. Специалисты-эксперты могут изменять начальные условия действия объекта или его структуру и находить требуемые заказчиком параметры и цели, но имитационные модели пока не могут самостоятельно находить требуемые решения.

Эта работа посвящена нахождению одного способа выбора **оптимальных решений при имитационном моделировании больших систем.**

Управляющие имитационные модели в отличие от аналитических математических моделей способны применять многокритериальные и многоуровневые модели без взвешивания целевых функций и даже без последовательной оптимизации по составляющим многокритериальной целевой функции.

Суть управляющих имитационных многокритериальных моделей заключается в следующем. **Во-первых**, имитация позволяет не ограничивать формы представления целевых функций и допускает также регулирование степени взаимосвязи между составляющими многокритериальной целевой функции. **Во-вторых**, имитационный подход не ограничивает методы составления многокритериальных целевых функций. Если при аналитическом моделировании система подстраивается под целевую функцию, то при имитационном подходе целевая функция выбирается под цели системы.

Здесь важен **принцип содержательной оптимизации**, который заключается в предварительном содержательном или описательном введении желаемых для объекта условий функционирования. Когда такие условия сформированы, оговариваются взаимодействие и взаимосвязь, а также те или иные ограничения условий оптимизации. Таким образом, формируется возможность управляемого допустимого компромисса как основы оптимального взаимодействия составляющих многокритериальной целевой функции.

Степень или величина уступки, учитывающая оптимальные или нормативные значения всех составляющих целевой функции, должна быть такой, чтобы выполнялись определенные условия уступки. Эти условия в зависимости от ситуации или от состояния объекта моделирования могут изменяться, т.е. они создаются в зависимости от состояния имитируемого объекта, системы или процесса.

Стратегия управляемого имитационного метода требует знания нормативов или оптимального значения энергии каждого элемента или подсистемы глобальной системы. Учитывая, что элементы потребляют и выделяют различные ресурсы, а наша модель имеет дело только с ресурсом в форме энергии, необходимо пересчитать необходимые ресурсы в форму энергии. Таблица пересчета некоторых ресурсов приведена в работе [3]. Нормативы должны быть разработаны специалистами, представляющими целевой план достижения цели системы.

Итак, чтобы получить величины управляющей энергии каждого элемента системы $\Delta E(a_u^0)$, нужно для каждого элемента системы a_u^0 знать фактическую энергию, потребляемую этим элементом $E^\Phi(a_u^0, t)$ в момент t , и задать нормативную энергию $E^n(a_u^0)$. **Что такое нормативная или оптимальная энергия?** Это энергия, которая

нужна элементу a_u^0 для достижения общей цели системы S . Суть нормативного метода управления заключается в следующем. Обозначим через $E^H(a_1^0, t), E^H(a_2^0, t), \dots, E^H(a_{u'}^0, t)$ нормативы величины энергии, необходимые для функционирования каждого элемента системы S . Норматив задает определенное числовое значение энергии по элементам.

Введем также показатель фактического потребления энергии по каждому элементу в виде

$$E^\Phi(a_1^0, t), E^\Phi(a_2^0, t), \dots, E^\Phi(a_{u'}^0, t).$$

У каждого элемента, если фактическая энергия меньше нормативной, имеется место дефицит энергии, что требует дополнительной порции энергии. Такой порцией может быть энергия управления $\Delta E(a_u^0, t)$ для этого элемента, т.е.

$$\Delta E(a_u^0, t) = E^H(a_u^0, t) - E^\Phi(a_u^0, t) \quad (1)$$

Вся требуемая энергия управления для системы S найдется таким образом:

$$E_{\text{упр}}(S, t) = \sum_{u=1}^{u'} \Delta E(a_u^0, t). \quad (2)$$

Итак, энергия управления системой S $E_{\text{упр}}(S, t)$ является дефицитом энергии системы S во времени t .

Введем теперь **показатель относительной степени недопотребления энергии** одного элемента a_u^0 системы S , т.е.

$$W(a_u^0, t) = \frac{E^H(a_u^0, t) - E^\Phi(a_u^0, t)}{E^H(a_u^0, t)}. \quad (3)$$

Показатель степени относительного недопотребления $W(a_u^0, t)$ пока не является целевой функцией или критерием. Но, если мы определили целевые нормативы потребления энергии каждого элемента a_u^0 , то разумно потребовать, чтобы этот показатель был одинаковым для всех элементов. Это условие является уже **целевой функцией** для всех элементов системы S , т.е.

$$\frac{E^H(a_u^0, t) - E^\Phi(a_u^0, t)}{E^H(a_u^0, t)} = \frac{E^H(a_{u+1}^0, t) - E^\Phi(a_{u+1}^0, t)}{E^H(a_{u+1}^0, t)} \dots \quad (4)$$

Эту целевую функцию можно назвать **целевой функцией пропорциональности** потому, что она определяет относительные дефициты энергии по каждому элементу системы S . Причем эти дефициты определены в соответствии с требованиями цели системы, если нормативы энергии элементов определены **в программно-целевом плане действий** системы (рис. 1).

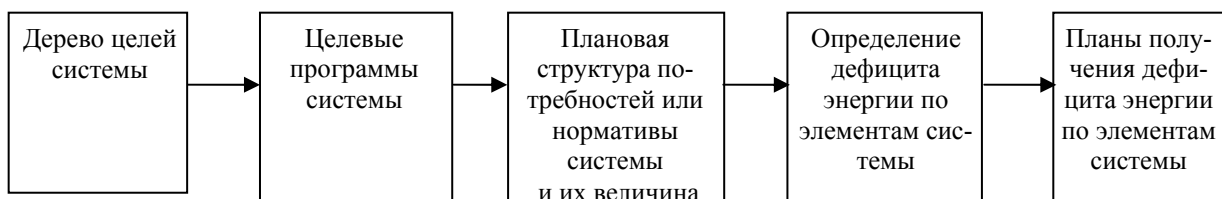


Рис. 1. Программно-целевая схема планирования действий системы

Данная схема предполагает в качестве предварительного этапа формирования целей или нормативов системы (объекта) планирования. Как правило, цели формируются в виде **дерева целей**, которое в конечном счете задает **целевые программы**.

Эти целевые программы представляют системный анализ, отображающий оценки **потребности или нормативы и их величину в форме энергии** по каждому элементу системы, а также альтернативные способы или направления их обеспечения по времени достижения главной цели системы S .

Программно-целевой план действий помогает системе S рассчитать показатель $W(a_u^0, t)$ по всем элементам и **проранжировать их по величине от больших до меньших значений**, тогда мы получим ряд ранжированных показателей степени относительного недопотребления энергии каждого элемента системы S .

Если в системе имеется управляющая энергия $E_{упр}(S, t)$, то эту энергию можно **передавать в первую очередь в те элементы, у которых значения $W(a_u^0, t)$ для различных элементов могут быть близкими или даже одинаковыми**, поэтому весь ранжированный ряд показателей $W(a_u^0, t)$ разбивается на интервалы, внутри которых показатели $W(a_u^0, t)$ признаются одинаковыми.

Итак, ряд ранжирования показателей элементов будет таким:

$$W^1, W^2, \dots, W^m, \dots, W^k, \quad (5)$$

где $m = \overline{1, k}$, где k – число интервалов, на которые разбит ряд ранжирования.

Пример 1. Имеется реальная система S (этот объект можно назвать областью или регионом России или другой страны мира). Эта система нуждается в различных видах топлива (уголь, нефть, мазут, торф и т.п.) для обеспечения энергией и теплом жителей и предприятий области. Энергетическая комиссия, рассмотрев все варианты привлечения этих топливных ресурсов в область, составила сравнительную табл. 1. В примере применяется норматив и фактический **уровень энергии** каждого вида топлива **в рублях на душу населения**, причем фактический уровень обозначается b_i , нормативный – H_i . Показатель относительной степени недопотребления будет W_i .

Таблица 1

Сравнительная характеристика альтернативных видов топлива

Виды топлива	b_i	H_i	W_i	Приоритет топлива
1	2	3	4	5
Уголь бурый	0,49	0,59	16,9	16
Уголь антрацит	0,65	0,84	22,6	14
Уголь марки С	0,37	0,67	44,7	7
Уголь марки Д	3,45	4,34	20,5	15
Сырая нефть	0,04	0,13	69,2	4
Торф	1,29	1,43	9,8	20
Солярка летняя	0,63	1,03	38,8	9
Бензин 92	0,84	1,66	49,4	6
Солярка зимняя	0,11	0,19	42,0	8
Мазут марки 1	1,78	2,00	11,0	18
Мазут марки 2	0,76	1,04	26,9	12
Мазут марки 3	0,25	0,87	71,3	3

Продолжение табл. 1

Виды топлива	e_i	H_i	W_i	Приоритет топлива
Газ природный	0,53	2,33	77,2	1
Газ сжиженный	0,81	1,27	36,2	10
Бензин 95	1,49	2,03	26,6	13
Бензин 98	0,42	0,60	30,0	11
Бензин 80	0,013	0,040	67,5	5
Дрова	0,37	0,41	9,8	19
Уголь марки Е	0,09	0,38	76,3	2
Прочие виды	0,36	0,41	12,2	17

Фактический уровень потребления ресурсов b_i берется из отчетных данных за истекший период по объектам, потребляющим эти виды ресурсов, а также из прогноза цен на ресурсы в планируемом периоде.

Показатели H_i и b_i могут быть в форме удельных показателей на одного жителя, одного работающего, на единицу валовой продукции и т.п.

Итак, в табл.1. приведены расчеты показателя степени недопотребления топливных ресурсов, определяющие первоочередность их для региона. В графе «Приоритет топлива» проставлены порядковые номера, показывающие приоритет или ранг данного топлива с точки зрения распределения лимитных средств $E_{\text{упр}}(S, t)$.

Первым получает часть лимита элемент **первого** приоритета (газ природный), далее – **второго** (уголь марки Е) и т.д. Например: $\{\Delta E_{13}(a_u^0, t) = [E_{13}^H(a_u^0, t) - E_{13}^F(a_u^0, t)] \cdot \text{Ч}\}$, $\{\Delta E_{19}(a_u^0, t) = E_{19}^H(a_u^0, t) - E_{19}^F(a_u^0, t) \cdot \text{Ч}\}, \dots$, где Ч – численность жителей области, причем $E_{\text{упр}}(S, t) \leq L$, где L – общий лимит энергии системы S .

Мы рассмотрели вариант имитационного управления системой, имеющей один уровень элементов, но управление в иерархических и многоуровневых системах требует другой, определенной схемы действий.

Поскольку моделируется многоуровневая система, то ее главная цель должна достигаться. Основную роль для достижения главной цели должны играть высшие уровни системы, в том числе – ее первый уровень. Однако эти уровни должны управлять общей системой **разумно**, т.е. управлять основными принципами и параметрами. Неосновными параметрами должны заниматься средние и низшие уровни.

Разумно – это значит **управлять** так, чтобы основные принципы, процедуры и параметры были ясны всем элементам на всех уровнях. Подсистемы на среднем уровне могут только **регулировать** деятельность своих элементов по **заданным границам, т.е. минимальным и максимальным величинам основных параметров в установленных границах**. Нарушать элементам эти границы нельзя. Внутри границ подсистемы могут управлять своими **элементами самостоятельно** по своим соображениям.

Первый уровень является самым важным, потому что он задает основную цель, а также принципы и параметры деятельности системы. Если эти показатели будут задаваться элементами среднего или нижнего уровня, то эта система скоро разрушится, поэтому **управление и регулирование** в иерархических и многоуровневых системах является важнейшей задачей, от которой зависит время жизни большой системы.

Управляемыми объектами могут быть элементы системы различных уровней и подсистем. Построение иерархической системы может осуществляться по различным схемам, вид которых определяется типом задачи, решаемой системой.

Рассмотрим некоторую многоуровневую иерархическую систему, представленную в виде «дерева», с уровнями γ , $\gamma = 1, 2, \dots, \gamma'$ (рис. 2).

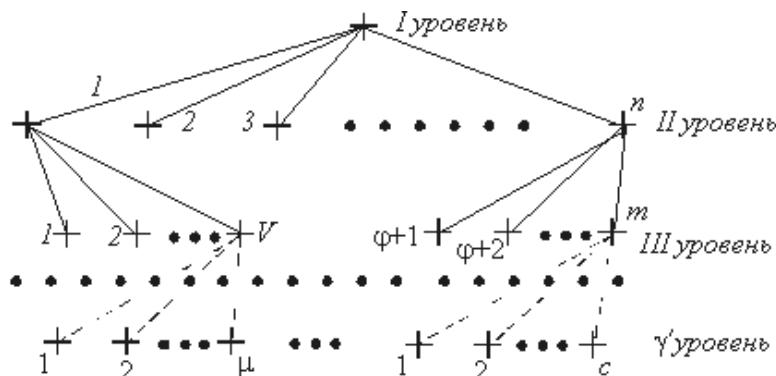


Рис. 2. Иерархическая система объектов, по которым идет распределение энергии или другого ресурса

Предположим, что «дерево» фиксирует иерархическую взаимосвязь уровней, подсистем и элементов системы, где идет распределение энергии или другого ресурса.

Итак, пусть γ – произвольный уровень дерева объектов. Элементы, принадлежащие уровню γ , будем обозначать $b_{\gamma}^{(\varphi)\omega_{\gamma}}$, где φ – номер элемента в любом уровне; ω_{γ} – номер подсистемы уровня γ . Например, $b_3^{(2)1_3}$ – элемент уровня 3 под номером 2 из подсистемы 1. Под подсистемой ω_{γ} понимается группа элементов уровня γ , имеющая непосредственную связь с одним из элементов (управляющим) вышестоящего уровня $\gamma - 1$. Таким образом, количество элементов в уровне $\gamma - 1$ определяется количеством подсистем в уровне γ . Элемент $b_{\gamma-1}^{(\varphi)\omega_{\gamma-1}}$ назовем управляющим для элементов своей подсистемы $\{b_{\gamma}^{(\varphi)\omega_{\gamma}}\}$.

Опишем таким образом систему и ее элементы, подсистемы и взаимосвязи. В целом по всем уровням системы (рис. 3) имеется множество элементов B , а именно:

$$B = B_1 + B_2, \dots, + B_{\gamma}, \dots, + B_{\gamma'},$$

где $B_1 = b_1^{(1)}$; $B_2 = [b_1^{(1)1_2}, b_2^{(2)1_2}, \dots, b_2^{(n)1_2}]$;

$$B_3 = \{[b_3^{(1)1_3}, b_3^{(2)1_3}, \dots, b_2^{(\bar{v})1_2}], \dots, [b_3^{(1)\omega_3}, b_3^{(2)\omega_3}, \dots, b_3^{(\bar{v}')\omega_3}], \dots, [b_3^{(1)\omega'_3}, b_3^{(2)\omega'_3}, \dots, b_3^{(v'')\omega'_3}]\};$$

.....

$$B_{\gamma'} = \{[b_{\gamma'}^{(1)1_{\gamma'}}, b_{\gamma'}^{(2)1_{\gamma'}}, \dots, b_{\gamma'}^{(\tau)1_{\gamma'}}], \dots, [b_{\gamma'}^{(1)\delta_{\gamma'}}, b_{\gamma'}^{(2)\delta_{\gamma'}}, \dots, b_{\gamma'}^{(\tau^0)\delta_{\gamma'}}], \dots, [b_{\gamma'}^{(1)\delta'_{\gamma'}}, b_{\gamma'}^{(2)\delta'_{\gamma'}}, \dots, b_{\gamma'}^{(\bar{\tau})\delta'_{\gamma'}}]\}.$$

Подмножества $B_1, B_2, \dots, B_{\gamma'}$ определяют совокупности элементов, принадлежащих определенному уровню.

Задача распределения энергии по элементам системы заключается в определении **лимитов энергии** $L^{(\varphi)\omega_{\gamma}}$ по элементам всех уровней (за исключением 1-го уровня, где лимит устанавливается вне данной модели), причем прежде всего самых важных объектов.

Чтобы рассмотреть общую процедуру управления системой, применим целевую функцию пропорциональности.

Модель управления по целевой функции пропорциональности строится таким образом, чтобы рассчитать относительные недопотребления ресурсов или энергии. Итак, в многоуровневой системе имеются элементы по всем уровням и подсистемам, а также какие-то нормативы $H_{\gamma}^{(\varphi)\omega_{\gamma}}$ ресурсов и фактические значения величины ресурсов по всем элементам $b_{\gamma}^{(\varphi)\omega_{\gamma}}$.

Управление или распределение энергии заключается в том, что если все нормативы и фактические значения энергии (ресурсов) имеются, то в такую модель вводится показатель относительного недопотребления ресурса (энергии).

Однако, все нормативы и фактические величины энергии (ресурсов) должны быть рассчитаны в одной размерности. Например, в денежном выражении или другом обобщенном измерении. Наиболее подходят измерения ресурса в форме энергии. Трудности перевода измерения ресурса в другую форму имеются, но не надо этого бояться [3].

Далее, рассчитаем целевую функцию пропорциональности, определяющую показатели относительного недопотребления по всем элементам (рис.3).

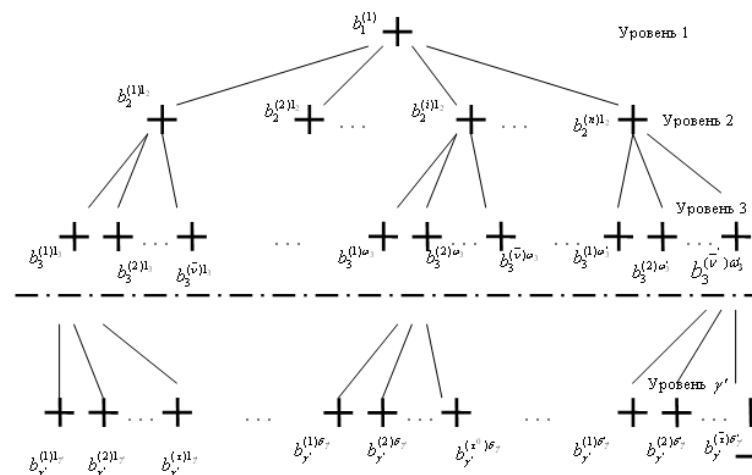


Рис. 3. Схема иерархической модели с выделением элементов и подсистем

Для простоты элементы системы обозначаются буквой $b_{\gamma}^{(\varphi)\omega_{\gamma}}$ и также обозначаются фактические значения величины ресурсов элементов, так как элементы и представляют величины ресурсов этих элементов.

Итак, показатель относительного недопотребления первого элемента $b_1^{(1)l_1}$ первого уровня в форме

$$W(b_1^{(1)l_1}, t) = \frac{H_1^{(1)l_1} - b_1^{(1)l_1}}{H_1^{(1)l_1}},$$

который показывает величину $W(b_1^{(1)l_1}, t)$ и абсолютный дефицит ресурса $\Delta E(b_1^{(1)l_1}, t)$, т.е.

$$\Delta E(b_1^{(1)l_1}, t) = H_1^{(1)l_1} - b_1^{(1)l_1}.$$

Абсолютный дефицит ресурса $\Delta E(b_1^{(1)l_1}, t)$ является лимитом ресурса второго уровня системы. По второму уровню также находятся показатели относительного недопотребления или целевая функция пропорциональности, т.е.

$$\frac{H_2^{(1)1_2} - b_2^{(1)1_2}}{H_2^{(1)1_2}} = \frac{H_2^{(2)1_2} - b_2^{(2)1_2}}{H_2^{(2)1_2}} = \dots = \frac{H_2^{(n)1_2} - b_2^{(n)1_2}}{H_2^{(n)1_2}} \quad (6)$$

и абсолютный дефицит ресурса каждого элемента второго уровня :

$$\Delta E(b_2^{(i)1_2}, t) = H_2^{(i)1_2} - b_2^{(i)1_2}, \quad (7)$$

который является лимитом ресурса третьего уровня.

Элементы второго уровня B_2 также должны ранжироваться по большей величине относительного недопотребления ресурсов. Эти элементы имеют абсолютные дефициты энергии, которая является управляющей энергией для элементов третьего уровня подсистем ω_3 общей системы.

Наконец, элементы $b_{\gamma'-1}^{(\tau)\delta_{\gamma'-1}}$ уровня $\gamma'-1$ являются управляющими элементами для последнего уровня γ' и определяют абсолютные дефициты $\Delta E(b_{\gamma'-1}^{(\tau)\delta_{\gamma'-1}})$, которые являются лимитами для элементов последнего уровня $b_{\gamma'}^{(\tau)\delta_{\gamma'}}$.

Естественно, элементы уровня $\gamma'-1$ также должны быть проранжированы по относительному недопотреблению ресурсов.

Элементы последнего уровня γ' также должны быть ранжированы:

$$\frac{H_{\gamma'}^{(\tau')1_{\gamma'}} - b_{\gamma'}^{(\tau')1_{\gamma'}}}{H_{\gamma'}^{(1)1_{\gamma'}}} = \dots = \frac{H_{\gamma'}^{(\tau'')\delta_{\gamma'}} - b_{\gamma'}^{(\tau'')\delta_{\gamma'}}}{H_{\gamma'}^{(\tau'')\delta_{\gamma'}}} = \dots = \frac{H_{\gamma'}^{(\tau)\delta_{\gamma'}} - b_{\gamma'}^{(\tau)\delta_{\gamma'}}}{H_{\gamma'}^{(\tau)\delta_{\gamma'}}}, \quad (8)$$

где τ' – общий элемент первой подсистемы, $\tau' = \overline{1, \tau}$; τ'' – общий элемент подсистемы $\delta_{\gamma'}$, $\tau'' = \overline{1, \tau^0}$; τ – общий элемент последней подсистемы $\delta_{\gamma'}$; $\tau = \overline{1, \tau}$.

Далее должны быть определены значения лимита энергии (ресурса) по всем элементам последнего уровня γ' , т.е.:

$$\Delta E(b_{\gamma'}^{(\tau'')\delta_{\gamma'}}, t) = H_{\gamma'}^{(\tau'')\delta_{\gamma'}} - b_{\gamma'}^{(\tau'')\delta_{\gamma'}}. \quad (9)$$

Сумма всех абсолютных дефицитов энергии (ресурса) каждого элемента системы S должна удовлетворять выражению

$$L \geq E_{\text{упр}}(S, t)$$

где L – общий лимит энергии (ресурса) системы S . Таким образом, мы имеем теоретическую модель многоуровневого управления системой.

Модель имитационного управления многоуровневой системой S представлена на рис. 4*, где все элементы описаны как типовой элементарный блок (ТЭБ) в программе УИМ-1 (см. [1, 2]). Блок (101) находится на самом верхнем уровне многоуровневой системы и определяет политику управления системой. Все элементы системы имеют какую-то энергию $b^{ik_{\gamma}}(t)$ и используют эту энергию для достижения своей частной цели, а далее в некоторый момент t_1 может задаваться норматив управления $H^{ik_{\gamma}}(t)$ для каждого элемента системы.

* Обозначения в имитационной модели (рис. 4) всех элементов системы соответствуют требованиям [1], но вместо $H_{\gamma}^{(i)W_{\gamma}}(t)$ пишем $H^{ik_{\gamma}}(t)$, а в $b_{\gamma}^{(i)\omega_{\gamma}}(t)$ пишем $b^{ik_{\gamma}}(t)$.

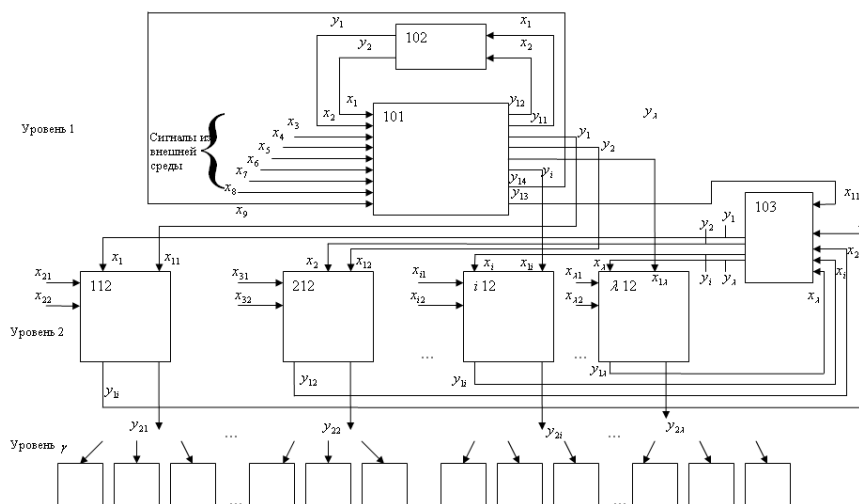


Рис. 4. Общая схематическая модель имитационного управления многоуровневой системы

(В верхней части показан фрагмент действующей модели имитационного управления на два уровня)

Таблица 2

Описание входов, выходов, состояний управляемой имитационной модели (фрагмент описания)

№	Входная клемма		Компоненты входного сигнала	Состояние и его компоненты	Вых. ход. клемма	Компоненты выходного сигнала	Вых. сигнал куда	Блок
	Какая	Откуда						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$x_1^{101}(t_0)$	$y_1^{102}(t_0)$	$(101,1,\pi_1^{101}(t) = \{ \varepsilon_1^{102}(t_0), \varepsilon_2^{102}(t_0), ..., \varepsilon_\lambda^{102}(t_0); t \})$	$S_1^{101}(t_0) = \varepsilon_1^{102}(t_0),$ $S_2^{101}(t_0) = \varepsilon_2^{102}(t_0),$ $..., S_\lambda^{101}(t_0) = \varepsilon_\lambda^{102}(t_0)$	$y_1^{101}(t_2)$	$[101,1,\varepsilon_1^{101}(t_2) = S_{31}^{101}(t_0);$ $\varepsilon_2^{101}(t_2) = S_{32}^{101}(t_1); \varepsilon_3^{101}(t_2) = S_{40}^{101}(t_2);$ $\varepsilon_4^{101}(t_2) = S_{41}^{101}(t_2); \varepsilon_5^{101}(t_2) = S_{51}^{101}(t_2);$ $\varepsilon_6^{101}(t_2) = S_{71}^{101}(t_2);$ $\varepsilon_7^{101}(t_2) = S_{81}^{101}(t_2); t]$	$x_1^{112}(t_2)$	
2	$x_2^{101}(t_1)$	$y_2^{102}(t_1)$	$(101,2,\pi_2^{101}(t) = \{ \varepsilon_{21}^{102}(t_1), \varepsilon_{22}^{102}(t_1), ..., \varepsilon_{2\lambda}^{102}(t_1); t \})$	$S_{21}^{101}(t_1) = \varepsilon_{21}^{102}(t_1),$ $S_{22}^{101}(t_1) = \varepsilon_{22}^{102}(t_1),$ $..., S_\lambda^{101}(t_1) = \varepsilon_\lambda^{102}(t_0)$		$[101,2,\varepsilon_{21}^{101}(t_2) = S_{31}^{101}(t_0);$ $\varepsilon_{22}^{101}(t_2) = S_{32}^{101}(t_1); \varepsilon_{23}^{101}(t_2) = S_{40}^{101}(t_2);$		
3	$x_3^{101}(t_0)$	$y_1^0(t_0)$	$(101,3,\pi_3^{101}(t_0) = b^{101}(t_0); t)$	$S_{31}^{101}(t_0) = b^{101}(t_0)$		$\varepsilon_{24}^{101}(t_2) = S_{42}^{101}(t_2); \varepsilon_{25}^{101}(t_2) = S_{52}^{101}(t_2);$ $\varepsilon_{26}^{101}(t_2) = S_{72}^{101}(t_2);$ $\varepsilon_{27}^{101}(t_2) = S_{81}^{101}(t_2); t]$		
4	$x_4^{101}(t_1)$	$y_2^0(t_0)$	$(101,4,\pi_4^{101}(t_1) = H^{101}(t_1); t)$	$S_{32}^{101}(t_1) = H^{101}(t_1),$ $S_{40}^{101}(t_2) = H^{101}(t_1) - b^{101}(t_0)$ $S_{41}^{101}(t_2) = b^{101}(t_0) \cdot \varepsilon_1^{102}(t_0);$ $S_{42}^{101}(t_2) = b^{101}(t_0) \cdot \varepsilon_2^{102}(t_0);$	$y_2^{101}(t_2)$	$\dots$	$x_2^{112}(t_2)$	
						$y_\lambda^{101}(t_2)$		

Для определенности будем считать, что система получает нормативы управления и фактическое потребление энергии случайно, причем нормативы в момент t_1 , а фактическое потребление в момент t_0 . Для этого существует блок (102) – см. рис. 4, который задает случайные сигналы. Например, сигналы $x_1^{101}(t_0)$ и $x_2^{101}(t_1)$ фиксируют в

состояниях $S_1^{101}(t_0), \dots, S_\lambda^{101}(t_0)$ и $S_{21}^{101}(t_1), \dots, S_{2\lambda}^{101}(t_1)$ случайные фактические доли энергии в момент t_0 элементов $\delta^{112}(t_0), \delta^{212}(t_0), \dots, \delta^{\lambda 12}(t_0)$ и далее энергии нормативов управления $l^{112}(t_1), l^{212}(t_1), \dots, l^{\lambda 12}(t_1)$ в момент t_1 на втором уровне.

Сигналы $y_1^{101}(t_2), y_2^{101}(t_2), \dots, y_\lambda^{101}(t_2)$ поступают в блоки (112), (212), ..., (λ 12), которые являются блоками второго уровня ($\gamma = 2$), где $i = \overline{1, \lambda}$.

В блоке (102) от сигнала $x_1^{102}(t_0)$ разыгрывается случайная функция $\delta(t_0)$, которая в начальный момент t_0 определяет доли энергии, $b^{112}(t_0), b^{212}(t_0), \dots, b^{\lambda 12}(t_0)$. Сигнал $x_2^{102}(t_1) = (102, 2, \pi_1^{102}(t) = \varepsilon_2^{101}(t_1) = 1; t)$ также разыгрывает случайную функцию $l(t_1)$, которая задает доли энергии нормативов управления в момент t_1 .

Блок (103) работает так, что входные сигналы происходят в различные моменты времени, т.е. $t_3, t_4, \dots, t_{2+i}, \dots, t_{2+\lambda}$. Сигналы $x_i^{103}(t_{2+i})$ содержат проекцию $\pi_i^{103}(t_{2+i})$, которая определяет приоритет блока (i 12) по потреблению энергии.

Все выходные сигналы $y_1^{103}(t_{2+\lambda+1}), y_2^{103}(t_{2+\lambda+2}), \dots, y_\lambda^{103}(t_{2+\lambda+\lambda})$ посылаются в элементы второго уровня и образуют множество, по элементам второго уровня, величин нормативной энергии элементов второго уровня. Эти значения нормативной энергии в дальнейшем используются для распределения энергии по элементам третьего уровня и далее процесс может продолжаться по всем уровням системы. Подробное описание блоков второго уровня (112), (212), ..., (λ 12), $i = \overline{1, \lambda}$, а также блоков (101), (102) и (103) см. в [3].

Заключение

Управляющие имитационные модели могут применяться, когда большому объекту (человеку, предприятию, объединению организаций, региону и др.) необходимо пропорциональное развитие в разных направлениях, а ресурсов (энергии) для этого не хватает. Причем для этого не нужно строить всю структуру объекта, а только определить приоритетные направления его деятельности и направить туда требуемые объемы ресурсов.

Литература

1. **Кобелев Н. Б.** Введение в общую теорию имитационного моделирования. М.: ООО «Принт-Сервис», 2007.
2. **Власов С. А., Девятков В. В., Кобелев Н. Б., Половников В. А.** Имитационное моделирование больших систем // IV Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». СПб.: ЦТСС, 2009.
3. **Кобелев Н. Б.** Большие системы и их имитационное управление. М: ООО «Принт-Сервис», 2011.

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ИНТЕРПРЕТАТОР КРИТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ И ИХ
ПОСЛЕДСТВИЙ В КОРАБЕЛЬНОЙ АСУ НА БАЗЕ УПРЕЖДАЮЩЕГО
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СИТУАЦИОННОГО АНАЛИЗА
КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ****Л. И. Ковтун, Н. А. Шарков (Санкт-Петербург)**

Эволюция теории управления происходит главным образом в сторону изучения объектов все большей сложности. Продукция судостроения отличается иерархической интеграцией сложно структурированных комплексов машиностроения и обслуживающего персонала (экипажа), функционирующих в условиях нестабильной природной среды, внешних и внутренних возмущающих воздействий, переменной технико-экономической или оперативно-тактической обстановки, а также в условиях корректировки целевых установок руководством отрасли, корпорации или фирмы. Одним из путей повышения эффективности функционирования таких сложных систем является рациональное разделение функций между компьютерными средствами автоматизации и человеком, принимающим управленческие решения (ЛПР). Локальные средства автоматизации на периферийных участках сложных систем, функционирующие по наперед заданным алгоритмам, уже доказали свою возможность полностью заменить человека. Однако именно за человеком-руководителем остаются наиболее важные решения по огромному объему получаемой информации, которая требует осмысления и адаптации к изменяющимся условиям, т.е. координации и корректировки алгоритмов функционирования управляемого объекта. Упреждающие прогнозные оценки развития текущих событий на основе анализа причинно-следственных связей позволяют концентрировать внимание руководства на критических траекториях, а также вырабатывать альтернативные управленческие решения по противодействию опасным последствиям критических событий.

Создание нового поколения автоматизированных систем управления судами и кораблями, морскими объектами и технологическими процессами (на объектах морской техники) включает разработку информационной поддержки командования или руководства в вопросах ситуационного анализа возможных рисков и вариантов принятия решений по их преодолению. Человек не в состоянии на основе простых рассуждений оценить риски, которые, как правило, определяются как вероятности возникновения нежелательных событий. Ответы на подобные вопросы возможны лишь на основе математического численного моделирования различного рода случайных процессов, происходящих на объектах морского назначения. В то же время результаты численного моделирования сложных процессов на корабле требуют дополнительного объяснения для руководства экипажа и раскрытия смысла предлагаемых ЭВМ машинных рекомендаций.

Следует отметить, что указанное направление исследований в зарубежной практике представлено многочисленными публикациями, ежегодными конференциями в старом и новом свете. Например, представляют интерес публикации [1, 2, 3] специалистов стран НАТО в области обеспечения безопасности современных кораблей. На рис. 1 показана схема организации взаимодействия операторов в центральном посту управления (ЦПУ) атомной подводной лодки класса «Вирджиния» в задачах безопасной навигации в надводном положении. В ЦПУ находится боевой расчет от восьми до восемнадцати человек, каждый из которых передает наиболее важную (или критическую) информацию непосредственному руководителю ЦПУ, вахтенному офицеру (ВО) до того, как эта информация достигнет командира корабля. Доклады командиру корабля (КК) осуществляются в устной форме по цепочке от операторов (рулевого, гид-

роакустического, штурманского, оптикоэлектронного, радиосвязного, радиолокационного постов и комплексов управления оружием) через специалистов – руководителей по освещению воздушной, надводной и подводной обстановки (координатора контактов) и далее вахтенного офицера. Командир корабля имеет возможность наблюдать визуально обстановку на мониторах всех постов и рабочих станций, хотя естественные психофизиологические ограничения человека не позволяют эффективно использовать эту возможность.

Важной задачей ВО является обобщение всей точной численной информации от операторов ЦПУ с целью выделения наиболее значимой (или критической, требующей немедленного принятия решения) для доклада командиру корабля. Эта задача связана с ситуационной оценкой всей внешней оперативно-тактической обстановки и внутреннего функционального состояния оружия, вооружения и технических средств корабля. Эта информация не должна быть перегружена деталями и второстепенными фактами, что предполагает предпочтение лингвистически-смысловой и визуально-образной информации по сравнению с числовой, графической или текстовой.

По мнению авторов статьи, эту задачу ВО следует также поручить ЭВМ. На современных кораблях и судах командир корабля оснащен автоматизированным рабочим местом (АРМ КК) в составе корабельной АСУ. Командир должен получать на свое АРМ дополнительно обработанную информацию подобно тому, как это сделано для вахтенного офицера. Эта информация должна быть отфильтрована от всей второстепенной, малозначащей в данный момент, т.е. быть обобщенной и представленной в удобном для восприятия формате.

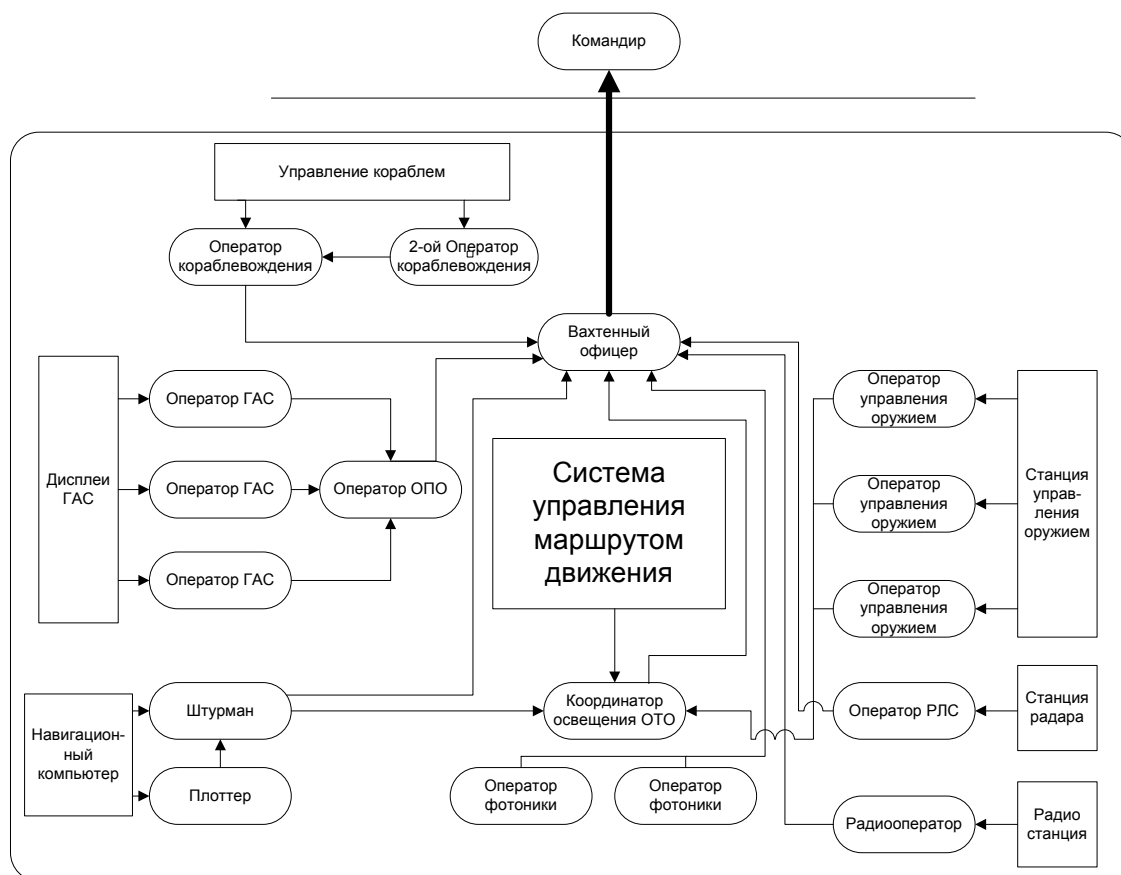


Рис. 1. Организация взаимодействия в структуре боевого расчета ЦПУ по освещению навигационной обстановки в районе надводного плавания (по материалам [1])

С учетом изложенного западные специалисты предлагают интерфейс командирского АРМ наполнить информацией, содержащей следующие элементы: фрагмент электронной карты в районе плавания с отображением проложенного маршрута движения корабля и всех наблюдаемых объектов, их текущего положения, траекторий движения, пересекающихся курсов; упреждающий расчет опасных областей возможных контактов. При этом отмечается необходимость мониторинга динамики и прогнозирования будущих событий для ситуационного анализа обстановки на акватории плавания. Такое предвидение должно базироваться на экстраполяции результатов мониторинга текущих параметров движения собственного корабля и судов участников движения в пределах ближней зоны их взаимодействия. Кроме изложенного АРМ командира должно представлять обобщенную текущую и прогнозную информацию о состоянии оборудования боевых и технических средств, обитаемости, условиях жизнедеятельности и состоянии здоровья экипажа корабля.

В боевых условиях задача обеспечения необходимой информацией АРМ командира сохраняется в принципиальных позициях, а именно, она должна быть наглядной и обозримой. Однако это потребует привлечения существенно больших вычислительных ресурсов корабельной АСУ.

Поясним, на какой методической базе решаются поставленные выше задачи информационного обеспечения руководителей сложных технологических комплексов коммерческого и военного назначения на примере публикации [2]. Авторы предлагают двухуровневую структуру системы противоаварийного управления корабельной техникой реального времени на основе супервизорной модели верхнего уровня, решающей задачу обоснования рекомендаций для командования, и частных имитационно-вычислительных модулей (симуляторов) на нижнем уровне. На рис. 2 представлена соответствующая структура решаемых задач, предлагаемая специалистами военного кораблестроения для ВМС США. Симуляторы определяют точные значения параметров некоторых аварийных процессов (развития пожара, затопления, потери остойчивости, первичных повреждений оборудования и т.п.) в прогнозных задачах упреждающего моделирования и решают задачу динамического пополнения баз знаний (обучения). С учетом результатов работы симуляторов формируются рекомендации для управленческих решений командования.

Симуляторы (термин, редко применяемый в отечественных научно-технических публикациях) – это цифровые вычислительные комплексы, реализующие имитацию непрерывных процессов «здесь и сейчас» в диалоге с ЛПР (или пользователем), который может получать промежуточные результаты вычислений и корректировать постановку вычислительных задач (по принципу: «а что будет, если...»). Симуляторы в режиме диалога реального времени позволяют осуществлять поиск эффективных управленческих решений методом «проб и ошибок» в том случае, если процессы в контуре вычислений более быстродействующие, чем в контуре управления. При этом супервизорный интерфейс АРМ руководителя борьбой за живучесть корабля (или интеллектуальный интерпретатор, по нашей терминологии) преобразует непрерывные процессы изменения контролируемых параметров в дискретные событийные процессы перехода оборудования и систем в состояния кратковременно допустимые, недопустимые и опасные по своим последствиям. Последующий ситуационный анализ логики развития аварии до катастрофы позволяет выделить критические траектории и рекомендации по их недопущению.

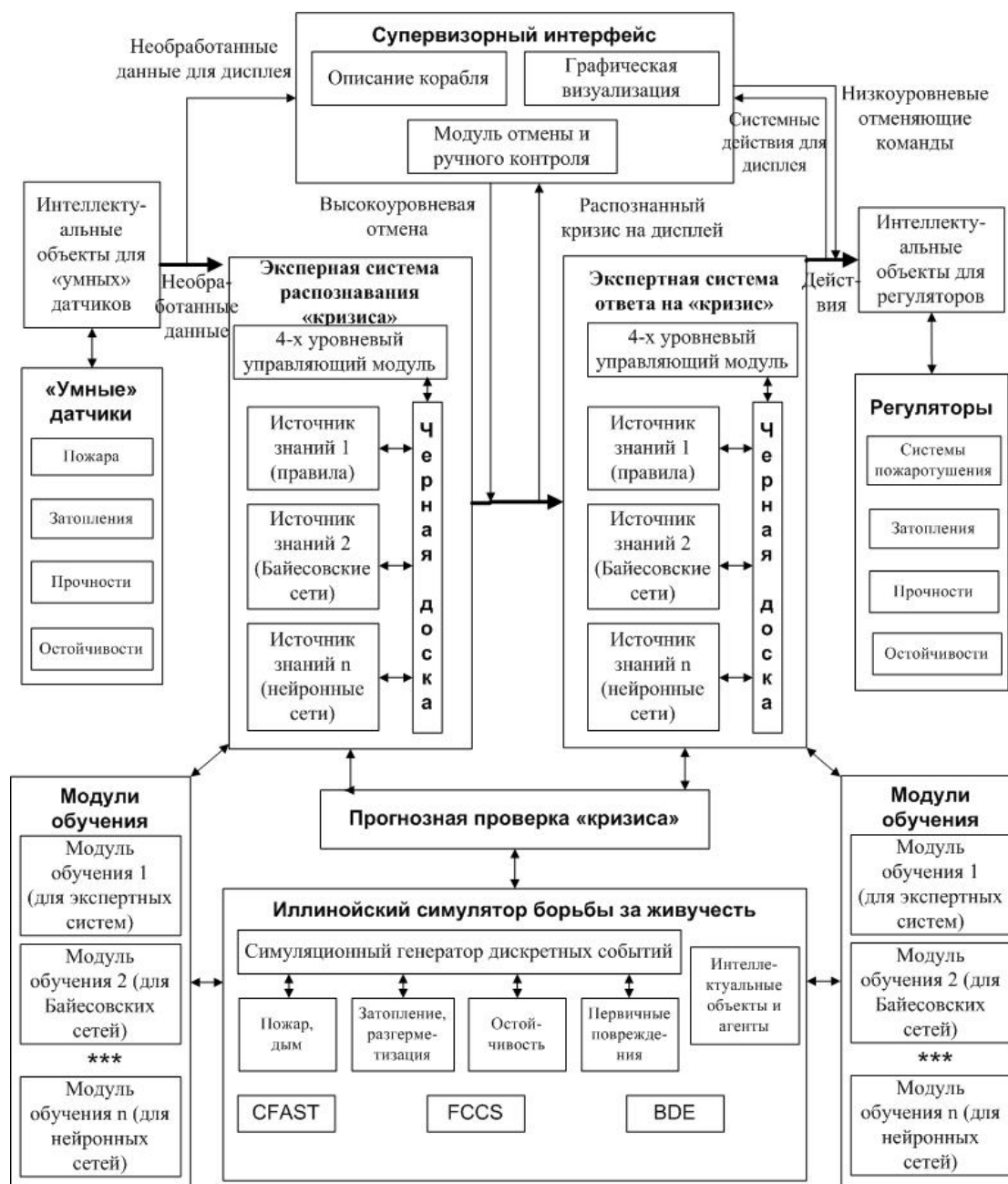


Рис. 2. Функциональная схема решения основных задач системой информационной поддержки процессов борьбы за живучесть, разрабатываемой для кораблей ВМС США

Супервизорный интерфейс представляет собой по существу обобщающую мета-модель, оперирующую базой знаний, которая основана на правилах логического вывода, байесовских и нейронных сетях, которые используют понятия нечетких множеств, нечеткой логики и алгебры суждений. В терминах межгосударственного стандарта [4] он выполняет функции центральной координирующей системы управления боевыми и техническими средствами корабля. Интеллектуальным ядром такой системы информационной поддержки является экспертная система с динамическим пополнением базы знаний, обобщающая результаты вычисляющих симуляторов.

ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» проводятся научные и экспериментальные исследования с целью повышения уровня автоматизации, надежности, живучести и безопасности кораблей, в том числе с учетом внедрения интегрированных решений

по управлению боевыми и техническими средствами [5–8]. Компьютерные технологии обеспечивают возможность практического использования информации любой степени точности, вследствие чего можно получать значительно более точные модели. Однако процессы управления кораблем требуют от ЛПР (командования) решения задач целеполагания (или целераспределения), т.е. подтверждения, изменения или корректировки текущих целей с учетом их последствий как для выполнения текущей задачи корабля, так и для функционирования старших систем военного назначения. Эти задачи трудно формализуемы, решение их основано на экспертных знаниях и не может быть доверено «автоматам» без участия человека. Таким образом, принятие наиболее ответственных решений остается прерогативой человека. Поэтому важной задачей разработчиков корабельных АСУ является создание пользовательского интерфейса АРМ командования, учитывающего эргономические требования к представляемой информации.

Непосредственно использовать результаты соответствующих статистических расчетов бортовых ЭВМ в режиме реального времени весьма проблематично, если не редуцировать их в обобщенные нечеткие знания экспертов на основе понятий *риска и опасности*. Риск – это численная или качественная оценка потенциальной опасности объекта или процесса. Существует множество определений риска, «рождённых» в различных ситуационных контекстах и с различными особенностями применений. Наиболее распространена точка зрения, что каждый риск в определенном смысле пропорционален как ожидаемым потерям (ранжированным по степени тяжести), которые могут быть причинены неблагоприятным событием, так и вероятности этого события. Для наших исследований сложных организационно-технических систем корабельного назначения будем различать два термина «опасность» и «риск». *Опасность* – это переход системы или оборудования в *состояние* с ограничением части функциональных возможностей или потерей части техники, имущества, здоровья людей, а также неблагоприятным воздействием на окружающую среду или ухудшением экологической безопасности.

Для термина *риск* воспользуемся рекомендациями международных и отечественных стандартов [9–11], которые определяют риск, как сочетание частоты (или вероятности) и тяжести последствий определенного опасного события. Эти стандарты вводят дополнительное ранжирование опасных последствий по категориям тяжести в виде «матрицы рисков» (в 5-бальной шкале относительной опасности). Это положение можно математически описать в понятиях теории нечетких множеств следующим образом.

Пусть $\{U\}$ – универсальное (полное) множество состояний боевых и технических средств (БиТС) корабля;

$\{X1\}$ – подмножество работоспособных состояний (с «0» опасностью);

$\{X2\}$ – подмножество с допустимыми отклонениями (с «min» опасностью);

$\{X3\}$ – подмножество со значительными отклонениями (с «mid» опасностью);

$\{X4\}$ – подмножество с недопустимыми отклонениями (с «max» опасностью);

$\{X5\}$ – подмножество с запредельными отклонениями (с «max max» опасностью).

Тогда нечеткое множество $X_n = \{(\mu_{X_n}^*(X_i), X_i)\}$, $\forall X_i \in \{U\}$ описывается совокупностью пар $\mu_{X_n}^*(X_i)$ и X_i , где $\mu_{X_n}^*(X_i)$ – степень принадлежности X_i множеству X_n , которая определена на отрезке $[0,1]$ (как степень опасности по тяжести последствий) [12, 13].

Таким образом, риски конечного множества опасных состояний корабля оцениваются с помощью нормированной величины на отрезке $[0,1]$, которая ранжирует опасность по степени тяжести. Кроме того риски оцениваются также величиной вероятности возникновения указанных опасных состояний объектов во временной области ана-

лизируемых процессов. Для построения функций принадлежности используются знания экспертов, а для построения вероятностных функций должны использоваться измерения и их статистическая обработка на реальных кораблях или на имитационных моделях (симуляторах) корабельных тренажеров. В настоящее время специалистами ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова» разработана программа для ЭВМ [14].

В зарубежном и отечественном кораблестроении наблюдается тенденция внедрения интегрированных средств автоматизации с целью повышения качества управления и снижения затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию. Первую цель планируется достичь за счет повышения интеллектуальности в задачах управления, а вторую – за счет унификации аппаратно-программных решений.

Интегрированная автоматизированная система управления перспективным кораблем (ИАСУК) будет включать три взаимосвязанные сетевые структуры: *сенсорную, центральную координирующую и боевую исполнительную*. Основной объем решаемых задач ИАСУК представлен на рис. 3.

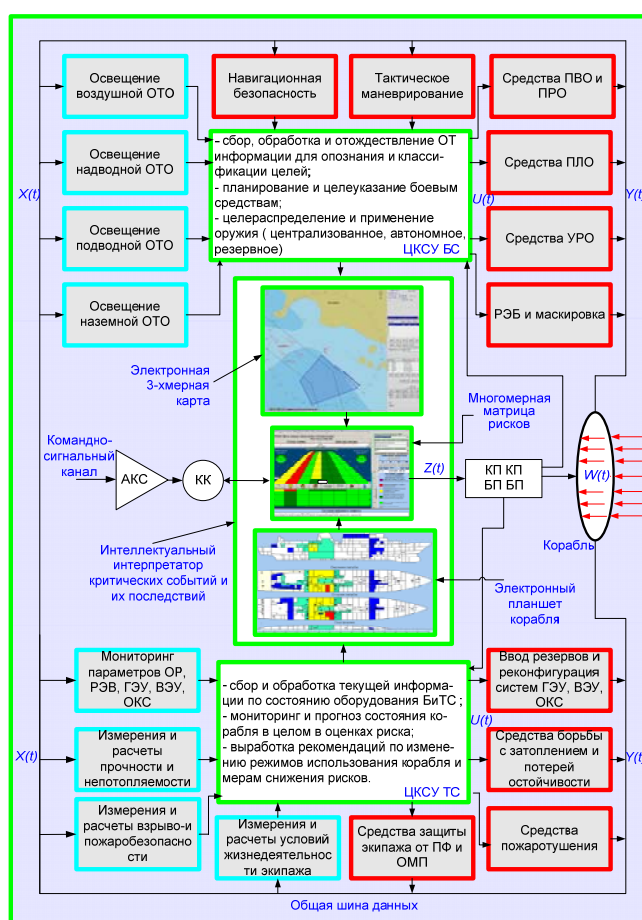


Рис. 3. Основной объем решаемых задач ИАСУК:

ОТО – оперативно-тактическая обстановка; ПВО – противовоздушная оборона;

ПРО – противоракетная оборона; ПЛО – противолодочная оборона; УРО – управление ракетным оружием; РЭБ – радиоэлектронная борьба; ЦКСУ – центральная координирующая система управления; КК- командир корабля; АКС – автоматизированный комплекс связи; КП – командный пункт; БП – боевой пост; ОР – оружие; РЭВ – радиоэлектронное вооружение; ГЭУ – главная энергетическая установка; ВЭУ – вспомогательная энергетическая установка; ОКС – общекорабельные системы; ПФ – поражающий фактор; ОМП – оружие массового поражения

На рисунке голубым цветом выделены задачи, решаемые сенсорной сетевой структурой, зеленым цветом – задачи, решаемые центральной координирующей сетевой структурой, и красным цветом – задачи боевой исполнительной структуры.

$X(t)$ – множество независимых измеряемых (или рассчитываемых) переменных, характеризующих внешнюю оперативно-тактическую и внутреннюю обстановку на корабле;

$Y(t)$ – множество управляемых переменных, характеризующих изменение состояния корабля и его боевых и технических средств;

$U(t)$ – множество управляющих воздействий на комплексы оружия и технических средств от аппаратуры центральной координирующей структуры (ЦКСУ БС и ЦКСУ ТС), а также на локальные автоматические регуляторы;

$Z(t)$ – множество корректирующих воздействий со стороны лиц командного состава, имеющих приоритет на принятие решений в соответствии с должностными обязанностями, в том числе по отношению к рекомендациям управляющих вычислительных систем.

Новое качество уровню информационной поддержки командования корабля будет давать «интеллектуальный интерпретатор критических событий и их последствий» в части концентрации внимания командира на важнейших направлениях принимаемых решений, а также при объяснении смысла машинных рекомендаций [15–17]. Функционирование «интеллектуального интерпретатора» основано на упреждающем имитационном моделировании и ситуационном анализе контролируемых процессов ИАСУК. Интерфейс интеллектуального интерпретатора для АРМ КК должен содержать:

- электронную трехмерную карту акватории плавания с отображением оперативно-тактической обстановки;
- электронный планшет корабля, отражающий состояние боевых и технических средств;
- многомерную матрицу рисков при использовании корабля по назначению в прошлом, текущем и ближнесрочном прогнозном интервалах времени.

В математической трактовке многомерная матрица рисков представляется многослойным графом некоторого списка объектов корабля, отражающим их иерархическую структурную организацию и изменение состояний во времени [7, 8].

Заключение

Обеспечение эффективного использования возможностей человека-руководителя в таких сложных системах, как военный корабль, – научная проблема современного постиндустриального общества, важная также для управления сложными технологическими комплексами гражданского назначения. Наиболее перспективным направлением этих исследований является разработка интеллектуальной надстройки в традиционных АСУ (супервизора, по терминологии западных специалистов). Такой супервизор интерпретирует для человека-руководителя численные результаты упреждающего имитационного моделирования контролируемых процессов в ситуационные оценки ожидаемых причинно-связанных событий, т.е. обеспечивает ЛПП ситуационным анализом или ментальной моделью (по англоязычной терминологии). Это направление исследований по «человеко-машинной» интеграции (Human-System Integration) предполагает использование теории нечеткого моделирования, нечеткой логики и нейрореподобных сетей. Человеко-машинный интерфейс в таких системах должен учитывать эргономические требования. Диалог должен вестись на профессионально-ориентированном подмножестве естественного языка с помощью лингвистических переменных, алгебры суждений и аудиовизуальных анимированных образов.

Литература

1. **Carrigan Geoffrey P.** The Design of an Intelligent Decision Support Tool for Submarine Commanders, 2009 (<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/53219>).
2. **Wilkins David C., Sniezec Janet A.** The DC-SCS Supervisory Control System for Ship Damage Control, Beckman institute, 2000 (www.beckman.illinois.edu).
3. **Cosby Lloyd, Lamontage Yvan.** Critical Assessment of Damage Control System Technologies, Defence Research and Development Canada, 2006 (<http://pubs.drdc.gc.ca/PDFS/unc63/p527467.pdf>).
4. ГОСТ РВ 19176-85. Системы управления техническими средствами корабля. Термины и определения.
5. **Ковтун Л. И.** Прогнозирование рисков и мер их снижения в задачах корабельных АСУ на основе теории нечеткого моделирования и точных расчетов параметров аварийных процессов // Сборник докладов научно-технической конференции концерна «Моринформсистема-Агат». М., 2011.
6. **Ковтун Л. И., Шарков Н. А.** Методы обобщения и интерфейсы представления информации на автоматизированное рабочее место командира в задачах безопасного кораблевождения при авариях // Судостроение. 2008. № 5.
7. **Ковтун Л. И.** Супервизорная система автоматизированного управления иерархически структурированными организационно-техническими комплексами морской техники с использованием имитационно-вычислительных симуляторов // СПб.: Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010, №54 (338).
8. **Шарков Н. А.** Анализ и синтез иерархически-интегрированных человеко-машинных комплексов управления морской техникой в аварийных условиях на базе интеллектуальных технологий // СПб.: Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010, №54 (338).
9. МС МЭК 60812. Техника анализа безотказности систем – анализ видов и последствий отказов.
10. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов.
11. ГОСТ 27.310-95. Надежность техники. Анализ видов, последствий и критичности отказов.
12. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 100 с.
13. **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.
14. Мониторинг, упреждающее моделирование и ситуационный анализ аварийных процессов и мер противодействия для систем автоматизированного управления сложными комплексами машиностроения морской техники. Программа для ЭВМ, получившая государственную регистрацию №2010613335 от 20 мая 2010 г.
15. ГОСТ РВ 1900-003-2008. Корабельные функциональные комплексы и автоматизированные системы управления. Типовой состав эргономических характеристик.
16. ГОСТ РВ 1900-004-2008. Организация взаимодействия корабельных специалистов с вычислительной техникой. Общие эргономические требования.
17. Проект ГОСТ РВ 0029. Системы поддержки деятельности оператора образца военной техники. Общие эргономические требования, 2005.

**ВАЛИДАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА
ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ *****В. Л. Конюх (Новосибирск)**

Доказательство соответствия разработанной модели объекту моделирования является основной проблемой моделирования [1]. Методика верификации и валидации зависит от того, существует ли система, для которой разрабатывают модель [2]. Для валидации модели существующей системы используют мнения заказчика, пользователя или эксперта, сравнивают результаты эксплуатации системы за реальное время с результатами моделирования за модельное время. Для валидации модели создаваемой системы сравнение откликов модели и объекта моделирования провести не удастся. В [3] предлагается вести статистическое сравнение выходов модели и реальной системы.

Представим процесс транспортирования в виде «черного ящика», на входы которого поступают грузы от рассредоточенных в пространстве источников грузопотоков, а на выходе через транспортное запаздывание появляется суммарный грузопоток (рис. 1).

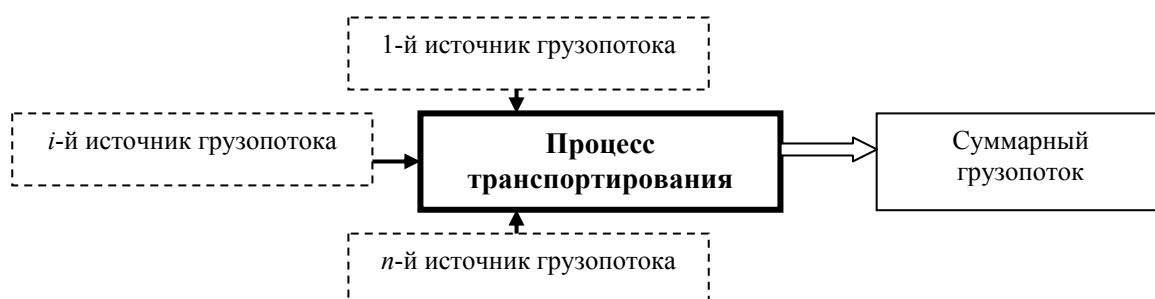


Рис. 1. Представление процесса транспортирования

Поток грузов может быть дискретным (коробки) или непрерывным (песок). Сравнение результатов непрерывного и дискретно-событийного моделирования потока сыпучих грузов в [4] показало, что непрерывный грузопоток может быть представлен движением дискретных грузов массой до 1 т. Поэтому процесс транспортирования можно отобразить последовательностью дискретных событий, которыми являются работа и остановка источника грузопотока или элемента транспортной сети, незаполнение или заполнение промежуточных складов. Через время t_k на выходе транспортной сети появляется груз от ближайшего источника грузопотока, а через t_j – суммарный груз от всех источников.

Для валидации имитационной модели процесса транспортирования нами предлагается два метода:

- сравнение грузопотоков на входе и выходе сети при имитации работы источников грузопотоков в разных комбинациях;
- сравнение времени появления или прекращения грузопотока в конце транспортной сети с расчетным временем движения при имитации случайной работы разных комбинаций источников грузопотоков.

Исходя из условий отсутствия потерь груза и появления новых источников грузопотоков за время доставки, сравним грузопотоки на входах и выходе транспортной системы:

* Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (грант 10-08-01211-а «Моделирование процессов добычи твердых полезных ископаемых на большой глубине»). Для разработки имитационных моделей применен программный продукт NetStar [5].

$$t_j \sum_{i=1}^m q_i = (t_j + t_l)Q,$$

где $\sum_{i=1}^m q_i$ – суммарный объем грузов, поступивших от m распределенных источников;
 t_j – j -й момент времени; t_l – время на доставку груза от самого удаленного источника; Q – объем груза на выходе транспортной системы.

Для валидации имитационной модели по истечении t_l сравнивают Q с $\sum_{i=1}^m q_i$, после чего делают вывод о соответствии модели объекту моделирования или калибруют модель. Время от начала работы i -го источника грузопотока до появления груза на выходе транспортной системы определяется как

$$T_i = \sum_{f=1}^F t_f,$$

где F – число участков сети между i -м источником грузопотока и выходом транспортной сети; t – время транспортирования груза по f -му участку сети.

Это же время может быть определено при имитации начала работы i -го источника грузопотока и определения момента появления груза на выходе транспортной системы. Входами концептуальной модели i -го источника грузопотока F_i являются случайные взаимоисключающие события: время работы Z_w или остановка Z_d на случайное время. Выходом является грузопоток Q_i (рис. 2).

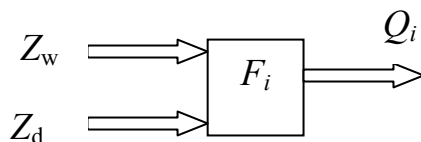


Рис. 2 . Концептуальная модель источника грузопотока

Входами концептуальной модели i -го элемента транспортирования C_i являются входной грузопоток $Q_{вх}$, длина доставки L_i , скорость перемещения V_i и емкость элемента Q_i . При $Q_i \leq Q_{вх}$, выходной грузопоток $Q_{вых}$ равен входному $Q_{вх}$, поэтому выходом является $Q_{вых}$ (рис. 3).

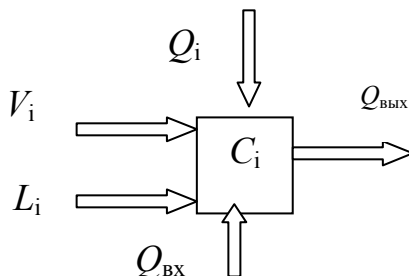


Рис. 3 . Концептуальная модель перемещения груза i -м элементом транспортирования

Масса груза на i -м элементе транспортирования сети в момент t_j :

$$M_i(t_j) = L_i n(t_j) \Delta q_i,$$

где n – число дискретных объемов груза на L_i ; Δq_i – масса груза в дискретном объеме.

После перемещения груза

$$Q_{\text{вых}} = Q_{\text{вх}} (t_j + L_i/V_i).$$

Таким образом, перемещение груза можно представить задержкой C_i в элементе транспортирования на время

$$Z_i = L_i/V_i,$$

Для j -го промежуточного склада B_j входами являются поступающий грузопоток Q_j , емкость склада S_b и скорость разгрузки V_p , выходом концептуальной модели – степень заполнения склада $N \leq S_b$ (рис. 4).

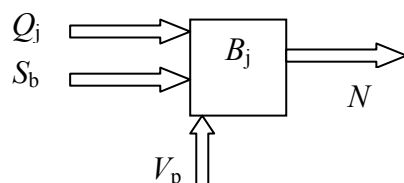


Рис. 4. Концептуальная модель движения груза через j -й промежуточный склад B_j

Для предотвращения переполнения или опустошения склада динамика его заполнения должна быть равна динамике потребления. Таким образом, пребывание груза на складе также можно представить задержкой грузопотока:

$$Z_i(N) = \begin{cases} 0, & N \leq n_2 \\ \Delta t \cdot N / n_2, & N > n_2 \end{cases},$$

где n_2 – число дискретных грузов на выходе склада; Δt – шаг времени между смежными дискретными грузами.

Степень заполнения склада изменяется в пределах

$$0 \leq N \leq S_b/q,$$

где S_b – емкость склада; $q = |Q_1 - Q_2|$ – разность объемов входного Q_1 и выходного Q_2 грузопотоков.

Разработка и валидация имитационной модели транспортной сети проводилась по заказу крупнейшей российской шахты «Распадская» (Междуреченск). Шахта ведет добычу угля из шести рассредоточенных под землей забоев F_1-F_6 (рис. 5).

Забой находится в случайных состояниях выдачи или прекращения грузопотока. Добытый уголь транспортируется девятью ленточными конвейерами C_1-C_9 на поверхность. В транспортной сети размещены пять промежуточных бункеров B_1-B_5 .

Сравнивались расчетное и модельное время появления и прекращения потока угля на поверхности. Известны число, длины и скорости конвейеров, связывающих забой с поверхностью. Время от начала работы забоя до появления угля рассчитывалось по формуле

$$T = L_1/V_1 + \dots + L_i/V_i + \dots + L_n/V_n,$$

где L_i – длина i -го конвейера, м; V_i – скорость ленты i -го конвейера, м/с; n – число конвейеров между забоем и поверхностью.

Так, для конвейерной линии C_4-C_5 расчетное время появления горной массы из забоев на сборном конвейере C_1 зависит от длин L_4, L_5 и одинаковых скоростей V конвейеров C_4, C_5 :

$$t = (L_4 + L_5)/V = 20 \text{ мин.}$$

Время от начала работы забоев F_1 , F_2 и F_3 до появления горной массы на сборном конвейере C_1 составило 22 мин., что, с учетом двух дополнительных интервалов модельного времени для забоя F_2 и бункера B_1 , соответствует расчетному (рис. 6).

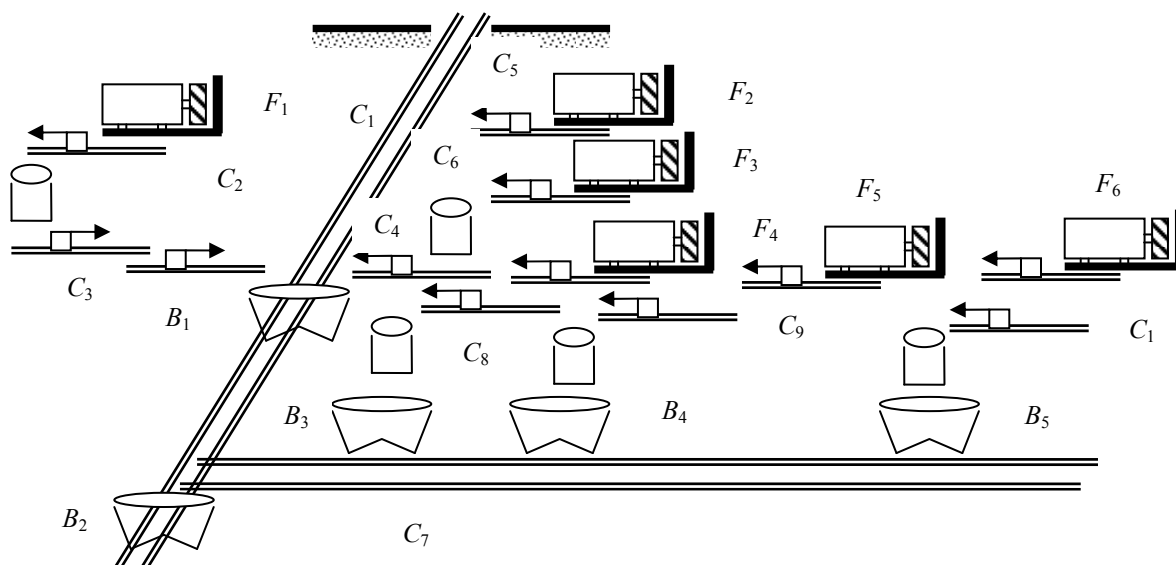


Рис.5 . Схема подземной транспортной сети шахты «Распадская»

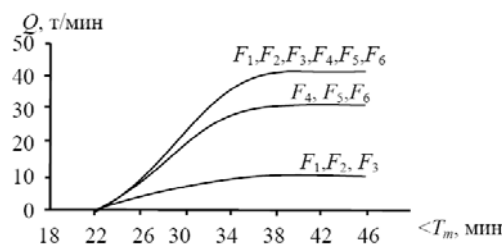


Рис. 6. Оценка времени T_m появления грузопотока Q на поверхности с момента начала работы забоев

Расчетное время стабилизации грузопотока из забоев, находящихся на разном расстоянии от сборного конвейера C_1 , разошлось с временем, полученным из имитационных экспериментов на 10,2%.

Далее имитировалось окончание работы забоев и оценивалось время, через которое поток горной массы на сборном конвейере C_1 должен прекратиться (рис. 7).

Так, по окончании работы самого удаленного от C_1 забоя F_4 время прекращения грузопотока рассчитывалось по длине $L_4 + L_8$ и скорости V конвейеров, соединяющих его со сборным конвейером:

$$t = (2000 + 4300)/189 = 33,3 \text{ мин.},$$

Сопоставлялись объемы горной массы на шести входах и выходе транспортной сети:

$$\sum_{i=1}^6 Q_i(t_k) = Q_{сб}(t_k + \Delta t),$$

где Q_i – грузопоток из i -го забоя в момент времени t_k ; $Q_{сб}$ – грузопоток по сборному конвейеру; Δt – транспортное запаздывание.

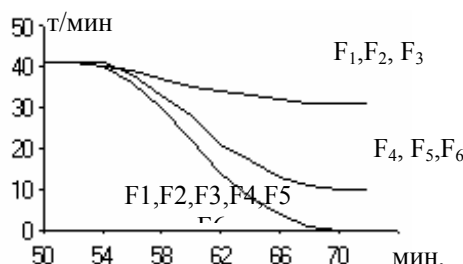


Рис. 7 . Оценка времени прекращения грузопотока на поверхности при имитации прекращения работы забоев

Расчетный объем грузопотока на выходе сети определен путем сложения объемов грузопотоков из забоев, работающих в разных сочетаниях. Транспортное запаздывание рассчитывалось по времени движения груза от забоя до поверхности. При имитационном моделировании объем грузопотока на выходе транспортной сети оценивался для таких же сочетаний работающих забоев. Расхождение результатов расчета и имитации для разных забоев составило 0,4–15,8%, что позволило считать разработанную модель соответствующей объекту моделирования.

Выводы

С целью валидации имитационных моделей транспортных сетей предлагается сравнивать грузопотоки на входе и выходе модели, а также расчетное и модельное время от начала или окончания работы источников грузопотоков до появления или прекращения грузопотока на выходе транспортной сети. Проверка методов при валидации моделей подземного транспортирования угольных шахт показала их работоспособность.

Литература

1. **Balci O.** Validation, Verification and Testing Techniques Throughout the Life Cycle of a Simulation Study / O.Balci // *Annals of Operation Research*. 1994. Vol.53. P. 121–174.
2. **Яцкив И. В.** Проблема валидации имитационной модели и ее возможные решения/ И.В.Яцкив// Доклады 1-й Всероссийской конференции по имитационному моделированию (ИММОД2003). СПб, 2003. Т. 1. С. 211–218.
3. **Kleijnen J. P. C.** Bootstrapping and Validation of Metamodels in Simulation/J.P.C., Kleijnen R.C.H. Cheng., A.J. Feelders// *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1998. P. 701–706.
4. **Lebedev A.** Simulation of Materials Handling Systems in the Mines: Two Case Studies/A. Lebedev, P.Staples// *Simulation*. 1998. Vol. 70. No. 3. P. 183–196.
5. **Конюх В. Л.** Имитатор NETSTAR (программное обеспечение)/ В.Л. Конюх, А. Ю. Михайлишин, В. В. Зиновьев, А.Н.Стародубов //Свидетельство № 20106117178 от 27.10. 2010 г. о Госрегистрации программы для ЭВМ.

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. В. Королев (Москва)

Для обеспечения возможности моделирования крупных систем и сложных процессов в интересах поддержки принятия решений в части строительства и применения Вооруженных Сил РФ признана необходимой унификация и интеграция всех разрабатываемых моделей (математических описаний) в единую информационно-моделирующую среду (ИМС), включающую в себя совокупность сертифицированных частных имитационных моделей объектов и процессов. Эта среда строится на основе программно-технических элементов базовых информационных защищенных компьютерных технологий.

Под *информационно-моделирующей средой* понимается взаимосвязанная система моделей объектов и процессов, информационных и расчетных задач в сфере вооруженной борьбы, строительства Вооруженных Сил (ВС) и военной экономики, включая средства их разработки и интеграции, предназначенная для поддержки принятия решений в областях планирования строительства и применения ВС, их боевой и мобилизационной подготовки, а также всестороннего обеспечения военного строительства.

Функциональная структура ИМС

Основу ИМС составляет взаимосвязанная многоуровневая система математических (имитационных) моделей и информационно-расчетных задач (ИРЗ), обеспечивающая поддержку принятия решений в областях строительства и развития ВС РФ, оперативного планирования (применения) ВС РФ и комплексного обеспечения оперативной и боевой подготовки (рис. 1).

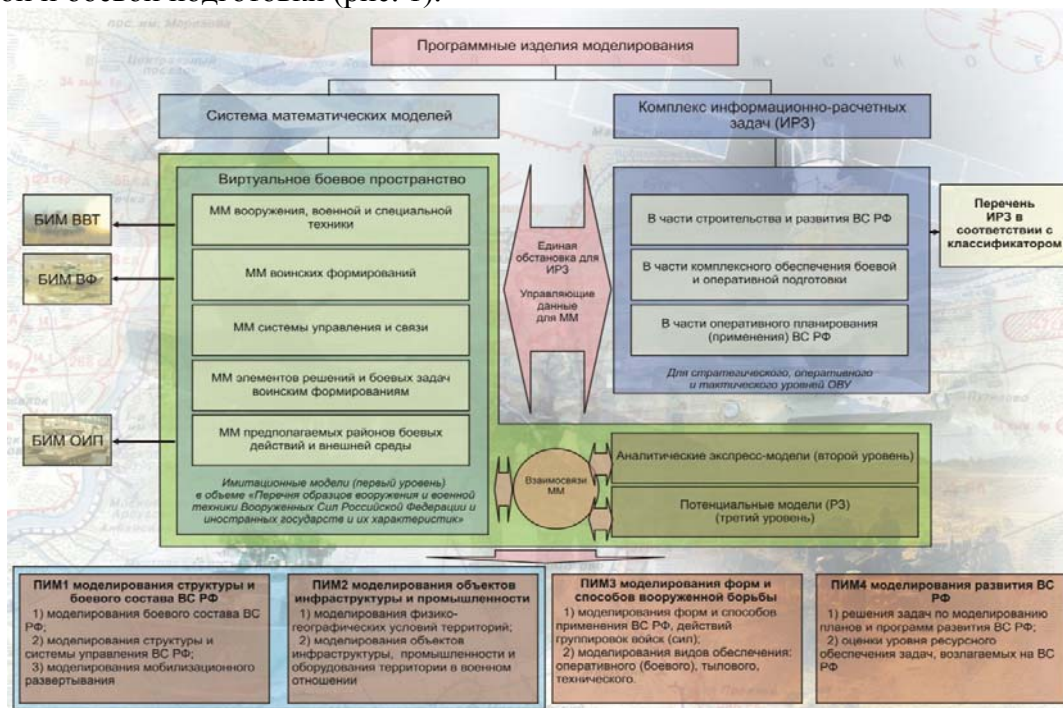


Рис. 1. Функциональная структура ИМС

Система математических моделей ИМС включает в себя модели трех степеней детализации (уровней):

- виртуальное боевое пространство (ВБП) (имитационные модели ВВТ, ВФ и ОИП);
- аналитические штабные экспресс-модели средней степени детализации (зонально-координатные);
- интегральные потенциальные модели (расчетные задачи).

При создании ИМС реализуется подход к формированию перечня моделей и ИРЗ в составе ИМС, включающий:

- формирование минимально-достаточного перечня информационно-расчетных задач и моделей для поддержки основных функций органов военного управления;
- последовательное расширение и унификацию перечня информационно-расчетных задач и моделей в процессе выполнения комплекса ОКР по созданию ИМС;
- информационно-расчетную деятельность органов военного управления на основе единой модельной оперативной (боевой) обстановки (все ИРЗ и модели старших уровней реализуются на основе виртуального боевого пространства, результаты решения ИРЗ определяют поведение моделей ВБП);
- формирование в результате информационно-расчетной деятельности органов военного управления «электронной» модели планирующего документа, например плана операции (боевых действий).

Виртуальное боевое пространство включает (рис. 2):

- средства создания шаблонов имитационных моделей объектов с различной детализацией их описания;
- имитационные модели систем и средств военного назначения, отражающие свойства отдельных образцов вооружения и военной техники, действующих в воздушном пространстве, на суше и на море;

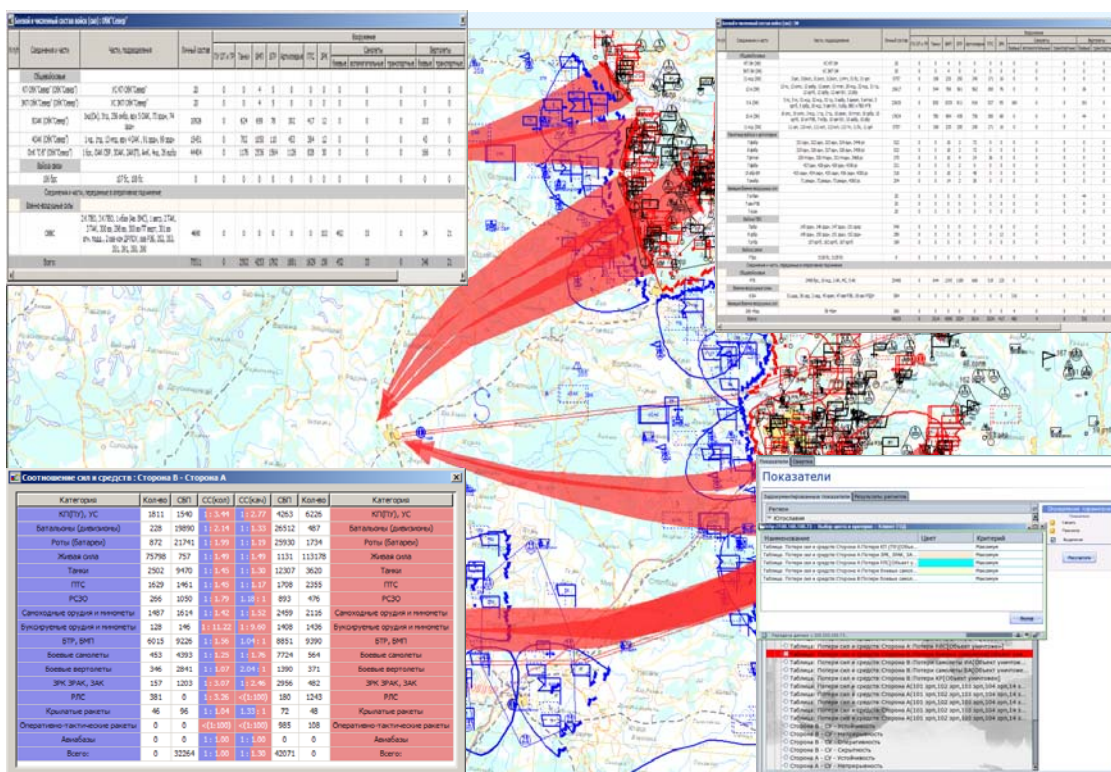


Рис. 2. Формирование моделей группировок войск в виртуальном боевом пространстве и моделирование их вооруженного противостояния

- имитационные модели группировок войск (сил), отражающие свойства различных воинских формирований, их взаимные связи и особенности, присущие видам, родам войск и уровням командной инстанции;
- имитационные модели систем военной связи и систем управления группировок войск (сил) и видов обеспечения;
- модели элементов решений и боевых задач воинских формирований;
- модели районов боевых действий, отражающие их физико-географические особенности и элементы инфраструктуры.

Возможности моделей виртуального боевого пространства приведены в табл. 1.

Таблица 1

Метод моделирования	Аналитико-имитационное пространственно-временное моделирование
Аспекты моделирования	Состав и структура, поведение объектов в ходе решения ими боевых задач
Степень детализации моделей	До отдельного взвода (роты) и отдельного ВВТ
Оперативная обстановка	Создание группировок войск (сил) любой сложности
Действия сторон	Моделирование различных форм и способов ведения военных действий
Представление результатов	Возможность задания необходимого состава показателей и форм их представления

Модели виртуального боевого пространства находят применение для поддержки принятия решений на всех уровнях органов военного управления (ОВУ) (тактическом, оперативном, стратегическом).

Аналитические экспресс-модели средней степени детализации находят применение для поддержки принятия решений на оперативном и стратегическом уровнях ОВУ. Их применение оправдано в условиях существования временных ограничений, неполноты или отсутствия детальной информации, что характерно, например, на этапе выработки замысла решения (рис. 3).

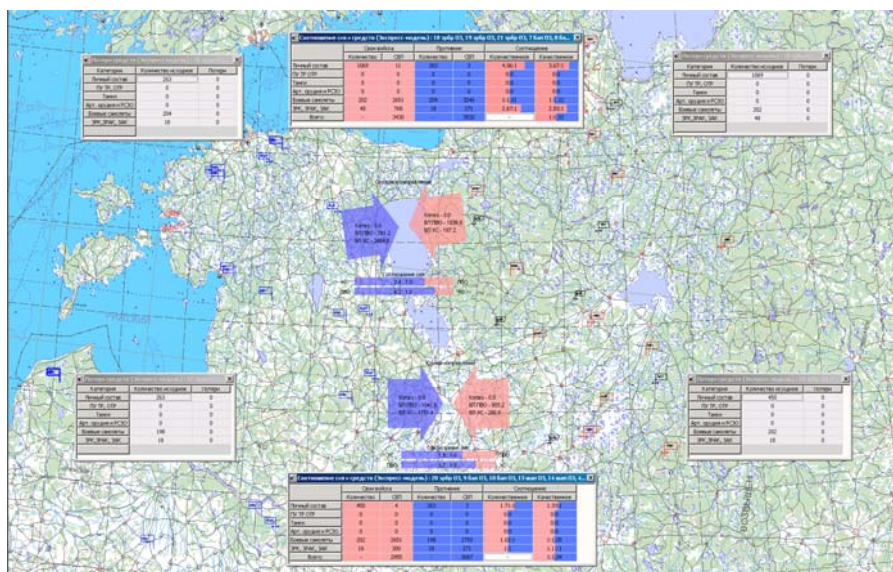


Рис. 3. Оценка варианта замысла решения с применением экспресс-модели ВВС и ПВО

Возможности аналитических экспресс-моделей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Метод моделирования	Аналитическое координатно-зональное моделирование
Представление воинских формирований	Использование штатного списка для описания боевого и численного состава
Представление результатов	Состав показателей и форм их представления аналогичен детальному уровню моделирования

Интегральные потенциальные модели (расчетные задачи) находят применение для поддержки принятия решений на стратегическом уровне ОВУ. Их применение оправдано для получения интегральных количественно-качественных оценок (рис. 4).

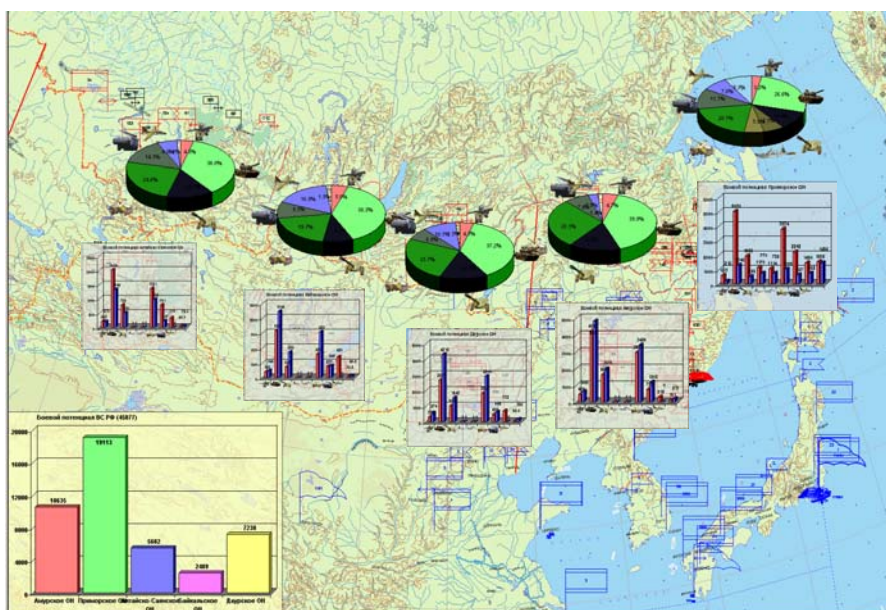


Рис. 4. Оценка боевых потенциалов ВС применением потенциальных моделей

Возможности потенциальных моделей приведены в табл. 3.

Таблица 3

Метод моделирования	Аналитические расчеты
Представление воинских формирований	Использование штатного списка для описания боевого и численного состава
Применение потенциалов ВВТ и воинских формирований	Виды потенциалов ВВТ: - безотносительные; - связанные с решением определенных задач воинских формирований
Представление результатов	Состав показателей и форм их представления аналогичен детальному уровню моделирования

Комплекс информационно-расчетных задач для обеспечения поддержки принятия решений в областях строительства и развития ВС РФ, оперативного планирования (применения) ВС РФ и комплексного обеспечения оперативной и боевой подготовки включает ИРЗ в соответствии с классификатором, первый уровень которого представлен на рис. 5.

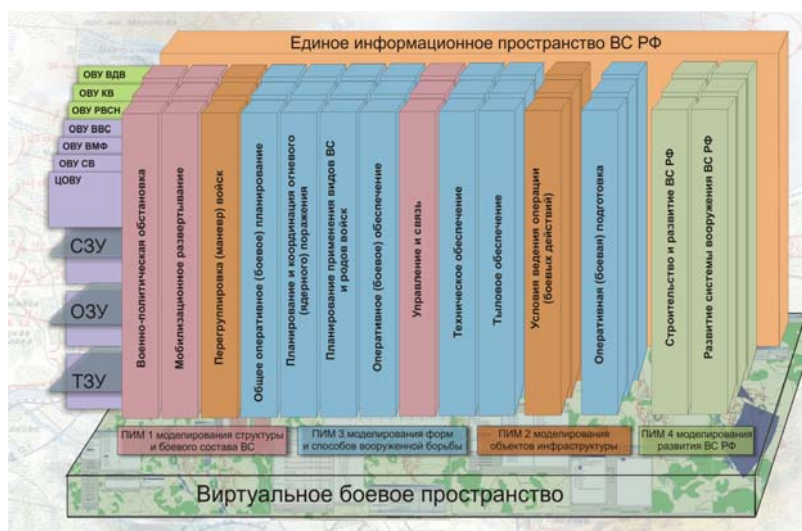


Рис. 5. Классификация ИРЗ и моделей в составе ИМС (проект)

В части ПИМ 1–ПИМ 3 комплекс ИРЗ и моделей обеспечивает:

- расчет времени на подготовку операции (боевых действий), формирование графика работы органа управления, контроль исполнения документов (мероприятий);
- создание моделей оперативно-тактической (оперативно-стратегической) воздушной, наземной и морской обстановки любой сложности, в любом районе (регионе) с любым составом войск (сил) и элементов инфраструктуры;
- оценку обстановки (боевого и численного состава, возможностей войск и сил сторон, количественно-качественного соотношения сил, возможностей ударных средств, зон огня и разведки, инфраструктуры, и т.п.);
- прогноз возможных действий противника и оценку их ожидаемых результатов;
- разработку замыслов операций (боевых действий) и оперативный (в ограниченное время) расчет их результатов;
- разработку и моделирование (для принятия решений) различных способов действий войск, сил, специальных войск и формирований по ведению операций, боевых действий;
- детальную разработку (для обеспечения планирования) действий родов войск (сил), и специальных войск, вопросов управления, взаимодействия и обеспечения;
- разработку замыслов и других документов для подготовки и проведения мероприятий оперативной подготовки.

Комплекс ИРЗ реализуется на основе моделей виртуального боевого пространства.

Организационная структура ИМС

Организационная структура ИМС должна обеспечить функционирование ИМС ВС РФ в виде распределенной защищенной программно-технической системы в интересах моделирования объектов и процессов и решения комплекса информационно-расчетных задач.

Конкретная реализация ИМС может быть либо в виде централизованного банка (с доступом к ее ресурсам потребителей в глобальной сети), либо локально устанавливаемой системы (предоставляющей свой ресурс в локальной сети).

Предполагается обеспечить два основных режима взаимодействия ИМС и потребителей ее ресурсов – АС ВН:

- распределенное моделирование;
- обмен данными, решение ИРЗ, моделирование в интересах АС ВН.

Режим *распределенного моделирования* подразумевает наличие помимо ИМС других элементов, способных функционировать в составе распределенной моделирующей системы. Этими элементами могут быть имитационные модели боевых действий (в том числе модели тренажеров, конструкторские модели), реализованные различными производителями, при условии поддержки ими отечественного стандарта распределенного моделирования, разрабатываемого на основе международного стандарта IEEE 1516.

Реализация режима распределенного моделирования в глобальной сети предполагается за счет использования информационно-телекоммуникационной системы и требует обеспечения:

- формирования (выбора) сценария распределенного моделирования;
- поддержки реализации сценария моделирования;
- документирования хода и результатов моделирования.

Режим *обмена данными, решения ИРЗ, моделирования* в интересах АС ВН предполагает необходимость поддержки специальными средствами:

- обмена данными между ИМС и АС ВН;
- выбора ИРЗ, ММ, формирования (выбора) данных для их решения, сценария моделирования;
- формирования запросов на решение ИРЗ, моделирование;
- получения результатов решения ИРЗ, моделирования.

Технологическая структура ИМС

Технологическая структура ИМС в интересах реализации режимов ее функционирования предполагает поддержку стандарта распределенного моделирования IEEE 1516, а также использование клиент-серверных технологий.

СПО ПИМ ИМС строится на основе базовых унифицированных средств построения ИМС (БУС ИМС), разрабатываемых с применением технологии объектно-ориентированного программирования и языка высокого уровня C++ (рис. 6).



Рис. 6. Состав БУС ИМС

При построении СПО ИМС реализуется открытая архитектура программного обеспечения. ПИМ ИМС разрабатываются на основе принципа модульности построения. Модульность ПИМ ИМС понимается не только в смысле модульности построения исходных программных текстов, но и подключения загрузочных модулей библиотек (рис. 7).

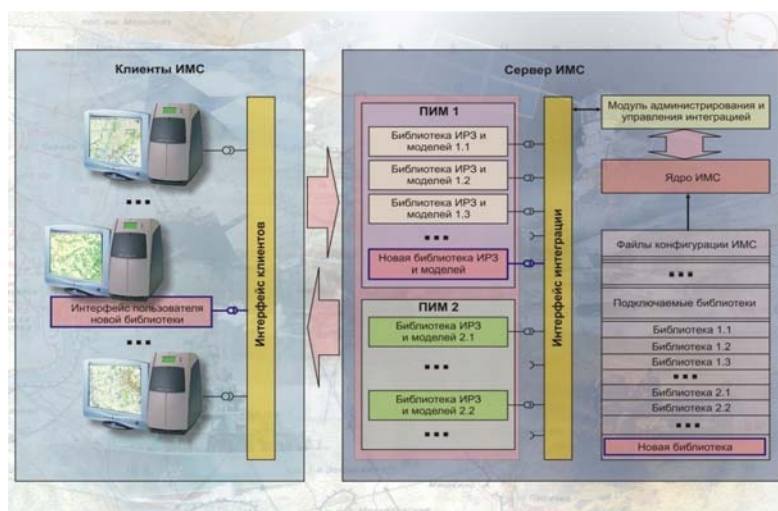


Рис. 7. Технология подключения ПИМ ИМС

Создание и функционирование ПИМ ИМС осуществляются на основе комплексного применения базовых информационных защищенных компьютерных технологий (БИЗКТ).

Роль и место ИМС в различных видах АС ВН

Целью разработки и применения информационно-моделирующей среды ВС РФ является *расширение возможностей* существующих и перспективных АС ВН за счет прогнозирования и обоснования формируемых планов ОВУ на основе моделирования и оценки их эффективности.

ИМС выступает в качестве функциональной подсистемы АС ВН в дополнение к командно-сигнальной и командно-информационной подсистемам, не дублируя их. Роль и место ИМС в различных видах АС ВН представлены в табл. 4.

Таблица 4

Виды АС ВН Функции подсистем АС ВН	АСУ войсками	Ситуационные центры ОВУ	АС оперативной и боевой подготовки	Комплексные тренажеры	Конструкторские моделирующие комплексы
КСС (командно-сигнальная система) доведение сигналов и команд управления и получение подтверждений об их получении и донесений об их выполнении	В полном объеме функций	—	В полном объеме функций	В части касающейся	—
КИС (командно-информационная система) сбор данных об обстановке, доведение задач до подчиненных и представление в старшие командные инстанции принятых решений и планов военных действий	В полном объеме функций	—	В полном объеме функций	В части касающейся	—
ИМС (информационно-моделирующая среда) систематизация, обобщение, хранение и представление необходимой информации должностным лицам органов управления (ОВУ), проведение расчетов и моделирования в интересах обоснования развития ВВТ, боевой и оперативной обстановки, поддержки принятия решения и планирования военных действий	Поддержка принятия решений и планирования операций (боевых действий)	В полном объеме функций (основа построения)	Внешняя среда, подготовка (обучение) должностных лиц ОВУ принятию решений и планированию операций (боевых действий)	Внешняя среда, средство комплексирования тренажеров	Погружение конструкторских моделей в оперативную (боевую) обстановку

Как видно из табл.4, вес рассматриваемых подсистем (КСС, КИС, ИМС) в конкретных видах АС ВН различен, отдельные подсистемы в них могут вообще отсутствовать.

Области и типовые сценарии взаимодействия ИМС ВС РФ и АС ВН

В качестве областей применения ИМС при взаимодействии с АС ВН можно выделить следующие (рис. 8):

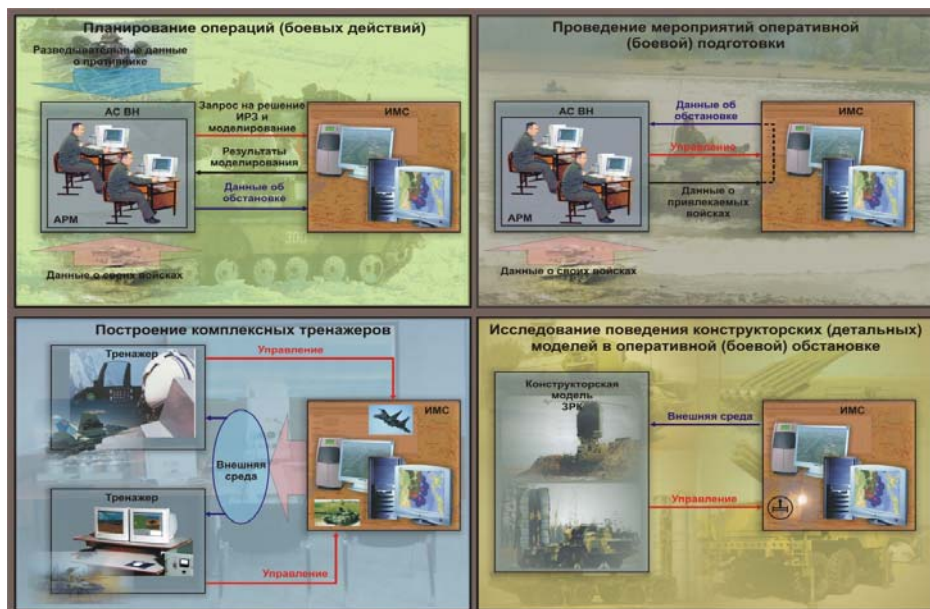


Рис. 8. Варианты применения ИМС в интересах расширения возможностей АС ВН

А) Поддержка принятия решений и планирования операций (боевых действий)

Типовой сценарий взаимодействия

На основе разведывательных данных о противнике и данных о своих войсках, получаемых из АС ВН (АСУ войсками), в ИМС автоматически с применением средств сопряжения создается модель обстановки (моделей группировок войск и сил сторон) и ее мониторинг.

С применением ИМС осуществляется поддержка:

- оценки обстановки (расчет и анализ боевого и численного состава, соотношения сил и средств сторон, их возможностей, физико-географических условий);
- выработки замысла операции (боевых действий) (на основе экспресс-моделей и расчетов ожидаемых результатов действий войск и сил сторон);
- разработки и принятия решения на операцию (боевые действия) (в зависимости от уровня командной инстанции – на основе детального или экспресс моделирования способов действий войск и сил сторон в операции или боевых действиях);
- планирования операции (боевых действий) (детальная разработка и расчет ожидаемых результатов применения родов войск и сил, специальных войск, видов обеспечения).

Б) Проведение мероприятий оперативной (боевой) подготовки

Типовой сценарий взаимодействия

На основе данных о своих войсках, привлекаемых к мероприятию, и замысле его проведения в ИМС создаются модели группировок сторон и определяются их задачи – создается внешняя среда проведения мероприятия.

Аналогично п. А может быть осуществлена поддержка принятия решения штабом руководства (заблаговременно) и обучаемыми под контролем штаба руководства.

Может быть произведено сравнение вариантов решений и планов обучаемых с эталонными посредством моделирования и осуществлена их оценка.

На этапе проведения мероприятия оперативной (боевой) подготовки заранее спланированные действия сторон подыгрываются ИМС с выдачей обстановки на АРМ АС ВН. Обучаемые в конкретных условиях обстановки принимают (уточняют) решения, ИМС подыгрывает развитие обстановки на основе управляющих воздействий обучаемых и реакции на них «противника».

При проведении мероприятия возможно активное участие группы, обозначающей противника и принимающей за него решения.

В) Построение сложных тренажерных моделирующих комплексов

ИМС применяется в нескольких качествах:

- средства комплексирования тренажеров (создания сложных тренажерных комплексов);
- активной единой внешней среды;
- средства организации двусторонних действий.

Применение ИМС в качестве средства комплексирования тренажеров обусловлено поддержкой режима распределенного моделирования на основе реализации стандарта распределенного моделирования IEEE 1516.

При этом тренажерные модели ВВТ «заменяют» соответствующие модели ВВТ ИМС и полностью управляют их поведением. Все воздействия других моделей ИМС на модели-копии передаются на тренажеры. Таким образом, все тренажеры находятся в едином моделируемом виртуальном поле боевых действий и «видят» друг друга. Получаемый таким образом «дополнительный эффект» позволяет организовать дуэли тренажеров, а также полномасштабные двусторонние действия в виртуальном пространстве.

Г) Исследование поведения конструкторских моделей в оперативной (боевой) обстановке

Аналогично п. В. В качестве модели тренажера п. В выступает детальная конструкторская модель.

**МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АГЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ
АВТОТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ
GPS-НАВИГАТОРОВ****А. А. Малыханов, В. Е. Черненко (Ульяновск)****Задача идентификации параметров агентов**

Идентификация параметров низкоуровневых имитационных моделей транспортных систем – сложная задача, которая в настоящее время решается, как правило, на основе данных, полученных в ходе точечных наблюдений транспортного потока [1]. Такие наблюдения могут проводиться с помощью специализированного переносного оборудования. Также для этих целей могут использоваться стационарные системы слежения за трафиком (например, «Поток»). На основе данных, полученных в ходе наблюдений, определяются распределения основных параметров агентов [2]. В дальнейшем по этим распределениям генерируются множества агентов с соответствующими значениями параметров. Обычно идентифицируют такие параметры агентов – участников движения, как предпочтительная скорость, ускорение, замедление при обычном и экстренном торможении.

При разработке низкоуровневой агентной имитационной модели для исследования вариантов организации «зеленой волны» на Димитровградском шоссе в Ульяновске возникла необходимость идентификации параметров агентной модели. Однако данные для идентификации отсутствуют, и не представляется возможным их собрать ввиду отсутствия специализированного оборудования. Поэтому типовые подходы к настройке имитационных моделей использовать невозможно.

Предлагаемый подход – использование GPS-треков

В сложившейся ситуации предлагается новый подход – использование данных GPS-навигаторов для получения информации о транспортном потоке. Этот подход достаточно прост в реализации, так как современные пользовательские GPS-навигаторы позволяют сохранять историю измерений (GPS-треки). С организационной точки зрения для сбора данных необходимо лишь согласие обладателей навигаторов сохранить и передать файл GPS-трека, записанного при проезде через исследуемый участок.

Предлагаемый подход позволяет с помощью построения графика скорости машин на участке – профиля скорости – получить необходимую информацию для идентификации трех основных параметров агентов:

- предпочтительной скорости V^P ;
- зависимости положительного ускорения от скорости $a^+(v)$;
- зависимости отрицательного ускорения от скорости $a^-(v)$.

Кроме того, предлагаемый подход обладает двумя существенными преимуществами.

Во-первых, благодаря тому, что единицей получения информации является участник движения, исключена возможность добавления в модель агентов, комбинации параметров которых не соответствуют никаким реальным участникам движения. Появление таких агентов возможно при использовании типового подхода, так как при нем параметры агента рассматриваются как независимые случайные величины.

Во-вторых, благодаря гораздо более высокой степени детальности и более «агентному» способу получения данных, существует возможность построения профиля скорости на исследуемом участке. Это, в свою очередь, позволяет более детально учитывать особенности движения на участке. Например, выбор скорости при движении через неровности, торможения перед изгибом дороги и т.п.

Общая схема применения предлагаемого подхода изображена на рис. 1.

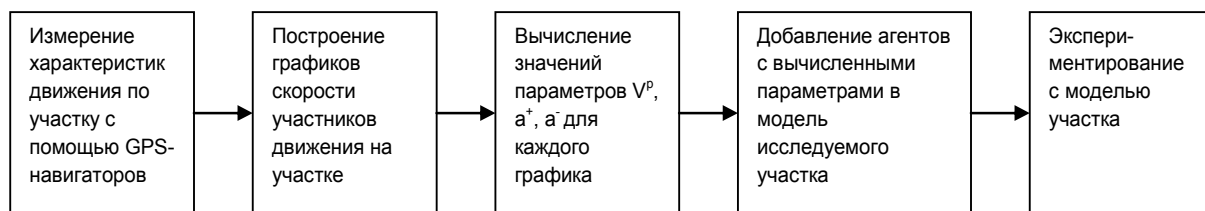


Рис. 1. Общая схема применения предлагаемого подхода

Искусство моделирования во многом заключается в поиске оптимального уровня детализации модели [3]. Так, может создаться впечатление, что детальность информации в GPS-треках чрезмерна для моделирования и потому необоснована. Однако описанный ниже пример убеждает в обратном. Он демонстрирует ситуацию, в которой данные, получаемые с помощью предлагаемого подхода, являются существенными с точки зрения исследования. Например, в процессе исследования возможности внедрения зеленой волны рассматривался фрагмент транспортной системы, изображенный на рис. 2, Б.

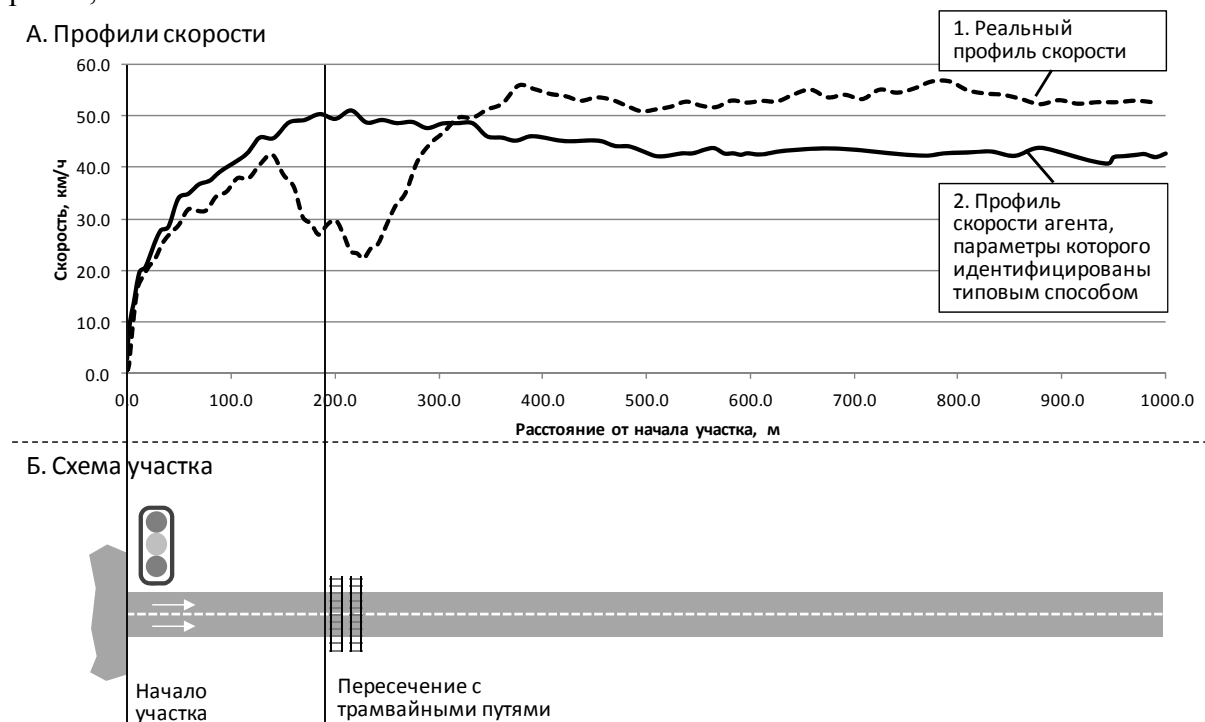


Рис. 2. Схема участка транспортной системы и профили скорости

Измерения потока показали, что средняя скорость на участке равна 48,4 км/ч. Это значит, что агент, параметры которого были идентифицированы типовым способом, после включения разрешающего сигнала набирает предпочтительную скорость, ускоряясь согласно собственным разгонным параметрам (профиль скорости 2, рис. 2, А). В действительности же из-за пересечения улицы с трамвайными путями профиль скорости автомобиля будет соответствовать графику профиля скорости 1 на рис. 2, А. Заметим, что средняя скорость на участке и в первом, и во втором случае одинакова, а ведь именно средняя скорость является критерием адекватности при типовом подходе к идентификации. Использование GPS-треков в данном случае позволяет более точно оценить предпочтительную скорость агентов на исследуемом участке. Параметр «предпочтительная скорость» влияет на моделирование разгона после включения зеленого

сигнала, что, в свою очередь, определяет количество машин, покинувших перекресток за одну разрешающую фазу светофорного регулирования. Таким образом, без учета профиля скорости моделирование пропускной способности перекрестка будет неадекватным. Использование профиля скорости позволяет уточнить модель, добавив в нее зону с ограничением предпочтительной скорости.

Для обработки большого объема данных, содержащихся в GPS-треках, была создана программа, позволяющая:

- выбирать на карте местности участок для замера характеристик движения;
- загружать файлы GPS-треков в формате gpx;
- рассчитывать профили скорости на основе информации, содержащейся в GPS-треках;
- экспортировать данные о профилях скорости в формат MS Excel;
- экспортировать файл конфигурации с параметрами агентов в формат MS Excel.

Библиотека «Трафик-эксперт» [4], с помощью которой осуществляется низкоуровневое имитационное моделирование транспортной системы, загружает файл конфигурации агентов и генерирует множество агентов в соответствии с данными в файле.

Процесс настройки низкоуровневой модели транспортной системы в соответствии с предлагаемым подходом схематично показан на рис. 3.

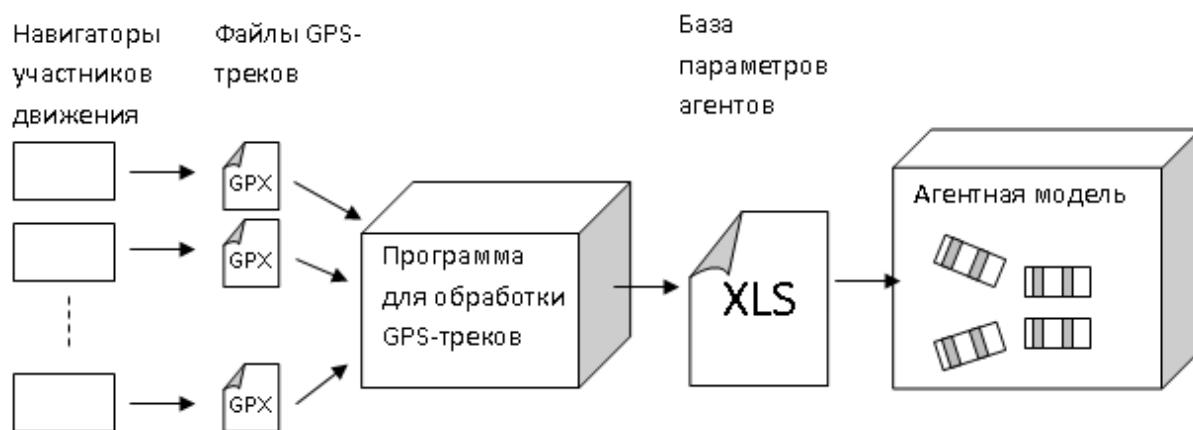


Рис. 3. Схема настройки агентной модели на основе данных GPS-навигаторов

Выводы и перспективы развития исследования

Таким образом, в результате работы было преодолено ограничение, связанное с недостатком информации о транспортном потоке на исследуемом участке дороги и отсутствием сложного измерительного оборудования. Использование данных GPS-навигаторов позволило уточнить модель, определив предпочтительную скорость на пересечении с трамвайными путями, что повысило адекватность моделирования пропускной способности участка.

Предлагаемый подход и разработанный программный продукт можно использовать не только для идентификации параметров множества агентов – доработка программного продукта может в дальнейшем обеспечить решение следующих задач:

- Автоматизация процесса идентификации параметров моделей транспортных систем путем подбора параметров на основе критерия адекватности, основанного на совпадении профилей скорости агентов и реальных участников движения.
- Более точный подбор параметров алгоритма следования [5] на основе данных эксперимента, при котором несколько участников движения двигаются друг за другом на протяжении некоторого времени с остановками и изменением скорости.

Литература

1. **Chu Lianyu.** A Calibration Procedure for Microscopic Traffic Simulation. // Annual Meeting Proceedings, 2004.
2. **Akcelik R., Besley M.** Microsimulation and analytical methods for modelling urban traffic. // Conference on Advance Modeling Techniques and Quality of Service in Highway Capacity Analysis Truckee – California – USA, 2001.
3. **Macal C., North M.** Proc. Tutorial on Agent-based Modeling and Simulation. // Winter Simulation Conference. 2005. P. 2–15.
4. **Малыханов А. А., Кумунжиев К. В., Черненко В. Е.** Среда имитационного моделирования транспортных систем // IV Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2009). СПб.: ЦНИИТС. 2009. С. 284–287.
5. **Jimenez T., Siegel G., Mussi P.** A road traffic simulator: car-following and lane-changing // Massachsets Institute of Technology, 2001.

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ПРИОРИТЕТНОЙ МОДЕЛИ ЗВЕНА ПЕРЕДАЧИ
ДАННЫХ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ

Л. А. Муравьева-Витковская (Санкт-Петербург)

Введение

Мультисервисные компьютерные сети (МКС) – специфические системы, предоставляющие услуги как компьютерных, так и телекоммуникационных сетей. Современные МКС характеризуются разнообразием предоставляемых пользователям услуг, увеличением числа пользователей и объемов передаваемых данных, повышением уровня требований к качеству обслуживания пользователей, неоднородностью трафика. Неоднородность трафика заключается в передаче по МКС пакетов нескольких типов (видео- и аудио-, речевых и текстовых пакетов и т.д.), к доставке которых предъявляются различные требования. Один из способов распределения сетевых ресурсов – распределение в соответствии с существующими на данный момент приоритетами. Поэтому в качестве модели звена передачи данных, состоящего из маршрутизатора и каналов связи, используется разомкнутая приоритетная сеть массового обслуживания, первый узел которой соответствует маршрутизатору, узлы с номерами 2 – n соответствуют каналам связи (рис. 1).

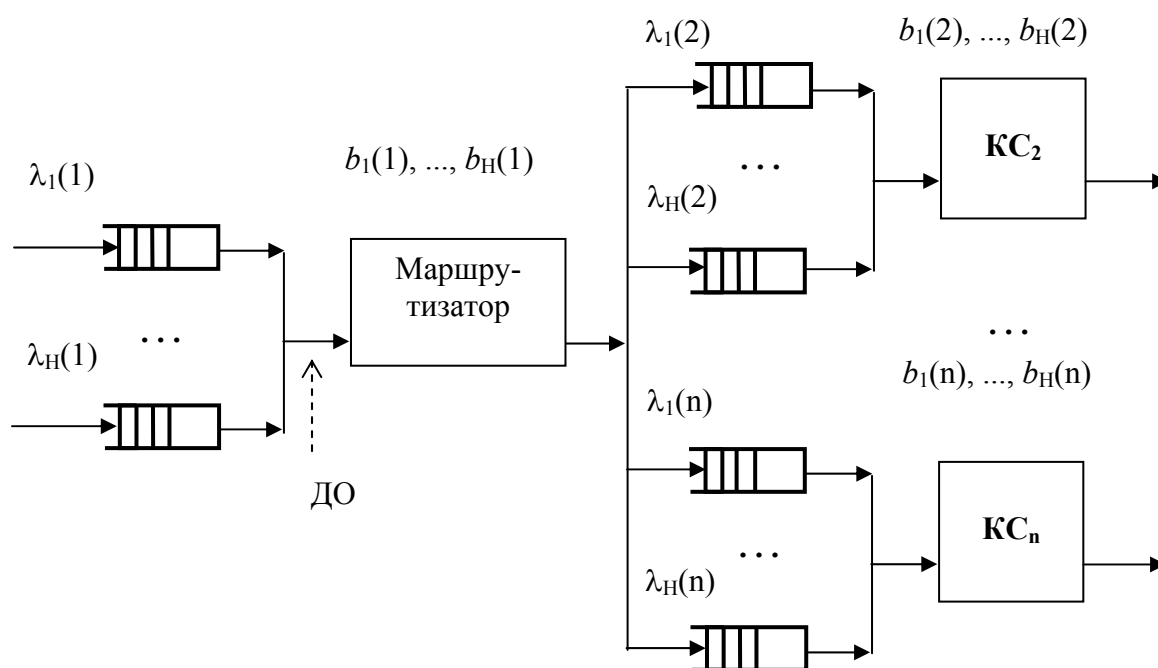


Рис. 1. Модель звена передачи данных

Неоднородность трафика, а также наличие приоритетов между пакетами различных типов резко усложняют аналитический расчет характеристик функционирования МКС на сетевых моделях. Несмотря на то, что в настоящее время имеются некоторые результаты по расчету приоритетных сетевых моделей с простой конфигурацией и частными дисциплинами обслуживания (ДО) [1], задача аналитического расчета сети с произвольной конфигурацией и ДО общего вида не получила своего решения.

Модель звена передачи данных представлена в виде разомкнутой сетевой модели, в узлах которой обслуживание заявок различных классов выполняется в соответствии с ДО общего вида из класса дисциплин обслуживания со смешанными приоритетами (ДО СП). При этом характеристики обслуживания заявок, такие как время ожидания и пребывания, число заявок в очереди, рассчитываются на уровне средних значе-

ний с учетом двух первых моментов распределений интервалов между поступающими в узлы заявками и длительностей обслуживания заявок в узлах.

Метод расчета излагается применительно к разомкнутой сетевой модели центрального обслуживания, которая наиболее подходит для отображения работы маршрутизатора с каналами связи. Однако данный метод может использоваться для расчета характеристик сетей любой конфигурации. При этом лишь увеличивается размерность задачи и становится более громоздким изложение материала.

Постановка задачи

Рассматривается модель функционирования фрагмента МКС в виде разомкнутой неоднородной сети массового обслуживания (СеМО), содержащей n одноканальных узлов.

Узел 1 сетевой модели называется центральным и отображает задержки, возникающие при маршрутизации пакетов в приоритетном маршрутизаторе, находящемся в данном узле передачи данных. Маршрутизатор в соответствии с заданным алгоритмом маршрутизации направляет пакет в один из каналов связи, выходящий из данного узла передачи. Каналы связи отображаются в модели периферийными узлами $2 - n$. Задержки, возникающие в этих узлах, соответствуют времени передачи пакета по соответствующему каналу. В СеМО циркулируют H классов заявок, отображающих пакеты разных типов, передающиеся по МКС.

Заявки класса h , поступающие в систему из внешней среды, обозначенной в модели как нулевой узел 0_h , образуют случайный поток с интенсивностью $\lambda_h(0)$ и коэффициентом вариации $\alpha_h(0)$ интервалов времени между последовательно поступающими заявками. Длительность обслуживания заявок класса h в узле j описывается произвольным законом распределения с математическим ожиданием $b_h(j)$ и коэффициентом вариации $\beta_h(j)$ ($j = 0, 1, \dots, n; h = 1, \dots, H$).

Обслуживание заявок в центральном узле выполняется в соответствии с некоторой ДО общего вида из множества дисциплин со смешанными приоритетами.

Маршруты заявок класса h в сети описываются матрицей вероятностей передач $P_h = [p_h(i, j)]$, где $p_h(i, j)$ – вероятность того, что после обслуживания в узле i заявка класса h попадает в узел j ($i, j = 0, 1, \dots, n; h = 1, \dots, H$). Заявки, покидающие сеть и отображающие завершение передачи пакета по каналу связи, возвращаются во внешнюю среду, обозначенную как узлы $0_1, \dots, 0_n$. Для рассматриваемой модели центрального обслуживания для узлов $i = 0, 2, 3, n$ вероятности передач равны: $p_h(i, 1) = 1$ и $p_h(i, j) = 0$ для всех $j \neq 1$. Вероятности передач $p_h(1, 0), p_h(1, 2), \dots, p_h(1, n)$ для узла 1

в общем случае отличаются от нуля и единицы, причем $\sum_{j=0}^n p_h(1, j) = 1$ ($h = 1, \dots, H$).

Данное условие означает, что заявки в сети не теряются и не размножаются, т.е. сетевая модель является линейной.

Задача оценки качества функционирования МКС заключается в определении характеристик сетевой модели, основными среди которых являются средние значения времени ожидания и пребывания заявок в сети. Остальные характеристики (длины очередей, число одновременно находящихся в сети заявок) могут быть получены на основе фундаментальных соотношений, справедливых для сетевых моделей общего вида. Указанные характеристики рассчитываются для отдельных классов заявок и для заявок объединенного потока как в каждом узле сети (узловые характеристики), так и для сети в целом (сетевые характеристики).

Расчет характеристик сетевой модели

Метод расчета разомкнутой СеМО с приоритетами основан на декомпозиции сети, т.е. представлении ее в виде отдельных независимых узлов с неоднородным потоком заявок различных классов, между которыми могут быть установлены приоритеты. Для этого в сетевой модели выделяются узлы композиции K , в которых происходит объединение нескольких потоков заявок в один, и узлы декомпозиции D , в которых заявки одного потока разветвляются по нескольким направлениям.

Рассмотрим некоторый выделенный узел $j = 1, \dots, n$ в виде СМО $G_H/G_H/1$ (рис. 2), в который поступает в общем случае H классов заявок с интенсивностями $\lambda_h(j)$ и коэффициентами вариации интервалов между заявками $\alpha_h(j)$. Длительность обслуживания заявок класса h описывается средним значением $b_h(j)$ и коэффициентом вариации $\beta_h(j)$. На выходе узла заявки класса h образуют поток, интенсивность которого равна интенсивности поступления $\lambda_h(j)$, а коэффициент вариации равен $\gamma_h(j)$ ($h = 1, \dots, H$).

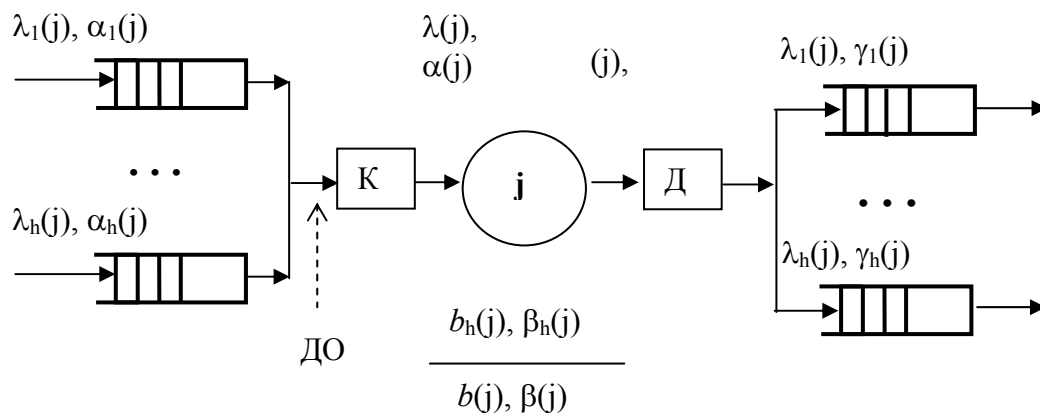


Рис. 2. Модель выделенного узла приоритетной сетевой модели

Интенсивности потоков заявок класса h в узлах линейной сети рассчитываются как $\lambda_h(j) = \xi_h(j) \lambda_h(0)$, где $\xi_h(j)$ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом передачи и показывающий среднее число попаданий заявки класса h в узел j за время пребывания в сети, определяется из следующей системы линейных алгебраических уравнений [2]:

$$\xi_h(j) = \sum_{i=0}^n p_h(i, j) \xi_h(i) \quad (j = 0, 1, \dots, n).$$

Для рассматриваемой модели центрального обслуживания $\xi_p(1) = 1/p_h(1, 0)$; $\xi_h(j) = p_h(1, j)/p_h(1, 0)$ для $j = 2, \dots, n$.

Процессы поступления и обслуживания заявок в выделенном узле $j = 1, \dots, n$ описываются следующими выражениями:

- интенсивность и коэффициент вариации объединенного потока заявок, поступающих в узел:

$$\lambda(j) = \sum_{h=1}^H \lambda_h(j); \quad \alpha^2(j) = \sum_{h=1}^H \pi_h(j) \alpha_h^2(j); \quad (1)$$

- среднее значение и коэффициент вариации длительности обслуживания заявок объединенного потока в узле:

$$b(j) = \sum_{h=1}^H \pi_h(j) b_h(j); \quad (2)$$

$$\beta^2(j) = \sum_{h=1}^H \pi_h(j) b_h^2(j) [1 + \beta_h^2(j)] / b^2(j) - 1. \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3) величина $\pi_h(j) = \lambda_h(j) / \lambda(j)$ характеризует вероятность того, что поступившая в узел j заявка принадлежит классу h ($h = 1, \dots, H$).

Коэффициент вариации выходящего из узла потока заявок определяется по следующей формуле [3]:

$$\gamma^2(j) = \alpha^2(j) + 2R(j)[1 - R(j)]w(j)/b(j),$$

где $R(j) = \lambda(j)b(j)$ – суммарная загрузка узла; $w(j) = \sum_{h=1}^H \pi_h(j) w_h(j)$ – среднее время

ожидания заявок объединенного потока; $w_h(j)$ – среднее время ожидания заявок класса h в узле j при заданной дисциплине обслуживания.

Коэффициенты вариации выходящего потока заявок каждого класса определяются как $\gamma_h^2(j) = 1 + \pi_h(j)[\gamma^2(j) - 1]$ ($h = 1, \dots, H$).

Для расчета среднего времени ожидания $w_h(j)$ в узле j заявок класса h используется приближенный метод, учитывающий неэкспоненциальный характер поступающих в узел потоков заявок. Этот метод основан на пересчете среднего времени ожидания $w_h^{\Pi}(j)$, полученного в предположении о простейшем характере потоков заявок, через средние времена ожидания при произвольном $w(j)$ и простейшем $w^{\Pi}(j)$ объединенном потоке заявок, полученными в предположении о беспriorитетном обслуживании заявок разных классов в данном узле:

$$w_h(j) = w(j) w_h^{\Pi}(j) / w^{\Pi}(j),$$

где $w_h^{\Pi}(j)$ определяется как функция элементов матрицы приоритетов [4]:

$$w_h^{\Pi}(j) = \frac{\sum_{i=1}^h r_g(i, h)[j] \lambda_i(j) b_i^{(2)}(j)}{2(1 - R_h^{(4)}(j))(1 - R_h^{(5)}(j))} + \frac{R_h^{(3)}(j) b_h^{(1)}(j)}{1 - R_h^{(3)}(j)}. \quad (4)$$

В данной формуле используются следующие элементы:

$$r_1(i, h)[j] = 0.5(1 - q_{ih}[j] - q_{hi}[j])(2 - q_{ih}[j] - q_{hi}[j]); r_2(i, h)[j] = q_{ih}[j](2 - q_{ih}[j]);$$

$$r_3(i, h)[j] = 0.5 q_{ih}[j](q_{ih}[j] - 1); r_4(i, h)[j] = r_2(i, h)[j] + r_3(i, h)[j];$$

$$r_5(i, h)[j] = r_1(i, h)[j] + r_4(i, h)[j]; r_6(i, h)[j] = r_2(h, i)[j] + r_5(i, h)[j];$$

$$R_h^{(g)}(j) = \sum_{i=1}^h r_g(i, h)[j] \lambda_i b_i^{(1)}(j) \quad (g = 3, 4, 5);$$

$$b_i^{(l)}(j) = \int_0^{\infty} \tau^l b_i(\tau)[j] d\tau \quad (l = 1, 2, \dots).$$

$$\text{Суммарная интенсивность определяется как } \Lambda_h^{(g)}(j) = \sum_{i=1}^h r_g(i, h)[j] \lambda_i(j).$$

Выражение (4) можно использовать для определения $w^{\Pi}(j)$, если все элементы матрицы приоритетов (МП) положить равными нулю.

Среднее время ожидания $w(j)$ в случае произвольного потока заявок, когда коэффициент вариации потока отличен от единицы, вычисляется по приближенной формуле, предложенной в [5]:

$$w(j) = 0,5b(j)R(j)(\alpha^2 + \beta^2)g(\alpha)[j]/(1 - R(j)). \quad (5)$$

В последнем выражении величина $g(\alpha)[j]$ определяется в зависимости от значения коэффициента вариации $\alpha(j)$ объединенного потока заявок, поступающих в узел j :

$$g(\alpha)[j] = \begin{cases} \exp\left\{-\frac{2(1-R(j))(1-\alpha^2(j))^2}{3R(j)(\alpha^2(j)+\beta^2(j))}\right\}, & \alpha(j) < 1; \\ \exp\left\{-\frac{(1-R(j))(\alpha^2(j)-1)}{\alpha^2(j)+4\beta^2(j)}\right\}, & \alpha(j) \geq 1. \end{cases} \quad (6)$$

Выбор формулы (5) для расчета $w(j)$ обусловлен тем, что, как показали исследования, это выражение позволяет с наименьшей погрешностью по сравнению с другими приближениями получить значение среднего времени ожидания в широком диапазоне изменений коэффициента вариации $\alpha(j)$ интервалов времени между поступающими заявками и коэффициента загрузки R . Так, для $R > 0,3$ при изменении коэффициента вариации $\alpha(j)$ в диапазоне от 0 до 2 погрешность результатов расчета по формуле (5) не превышает 15% и резко уменьшается с увеличением загрузки R . В то же время другие приближения, полученные, в том числе, на основе диффузионной аппроксимации, дают удовлетворительные результаты лишь при больших значениях загрузки: $R > 0,5-0,7$.

Процедура расчета сетевой модели звена передачи данных МКС базируется на методе итераций, который используется для определения коэффициентов вариации $\alpha(j)$ интервалов времени между поступающими в узел $j = 1, \dots, n$ заявками класса $h = 1, \dots, H$. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока в некотором узле, в качестве которого будем использовать центральный узел, коэффициенты вариации входящих потоков заявок, вычисленные в предыдущем и последующем шагах, не совпадают с априори заданной точностью ε .

Итерационная процедура реализуется по следующей схеме.

1. Выделяется центральный узел 1, и на основе выражений (1)–(6) рассчитываются коэффициенты вариации выходящего потока заявок $\gamma_h(1)$ в предположении, что $\alpha_h(1) = \alpha_h(0)$.

2. Определяются коэффициенты вариации $\alpha(j)$ потоков заявок, поступающих в узлы $j = 2, \dots, n$ по формуле (1), где $\alpha_h^2(j) = 1 + p_h(1, j)[\gamma_h^2(1) - 1]$.

3. Последовательно для узлов $j = 2, \dots, n$ рассчитываются коэффициенты вариации выходящего потока заявок $\gamma_h(j)$.

4. Рассчитываются новые значения коэффициентов вариации $\tilde{\alpha}_h(1)$ поступающих в центральный узел потоков заявок: $\tilde{\alpha}_h^2(1) = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq 1}}^n p_h(1, j)\gamma_h^2(j)$.

5. Пункты 2–4 выполняются до тех пор, пока $|\tilde{\alpha}_h(1) - \alpha_h(1)|$ для всех $h = 1, \dots, H$ не станет меньше ε .

Для полученных значений коэффициентов вариации $\alpha_h(j)$ потоков заявок с использованием формул (4)–(6) рассчитываются средние времена ожидания $w_h(j)$ заявок класса $h = 1, \dots, H$ в узлах $j = 1, \dots, n$ сетевой модели.

Далее определяются узловые и сетевые характеристики по следующим формулам.

Узловые характеристики $j = 1, \dots, n$ для заявок класса $h = 1, \dots, H$:

- среднее время пребывания заявок $u_h(j) = w_h(j) + b_h(j)$;

• средние значения длины очереди и числа заявок в узле
 $l_h(j) = \lambda_h(j)w_h(j); \quad m_h(j) = \lambda_h(j)u_h(j).$

Аналогичные характеристики для объединенного потока заявок:

$$u(j) = \sum_{h=1}^H \pi_h(j)u_h(j); \quad w(j) = \sum_{h=1}^H \pi_h(j)w_h(j); \quad l(j) = \lambda(j)w(j); \quad m(j) = \lambda(j)u(j).$$

Сетевые характеристики для заявок класса $h = 1, \dots, H$:

• средние времена пребывания и ожидания заявок в сети
 $U_h = \sum_{j=1}^n \xi_h(j)u_h(j); \quad W_h = \sum_{j=1}^n \xi_h(j)w_h(j);$

• среднее число заявок, находящихся в сети и в очередях
 $M_h = \sum_{j=1}^n m_h(j); \quad L_h = \sum_{j=1}^n l_h(j).$

Аналогичные сетевые характеристики для объединенного потока заявок:

$$U = \sum_{h=1}^H \pi_h(0)U_h; \quad W = \sum_{h=1}^H \pi_h(0)W_h;$$

$$M = \sum_{h=1}^H M_h = \sum_{j=1}^n m(j); \quad L = \sum_{h=1}^H L_h = \sum_{j=1}^n l(j).$$

Погрешности результатов расчетов, как показало имитационное моделирование, в большинстве случаев составляют не более 20–30% для сетевых характеристик, причем с увеличением загрузки узлов точность выполняемых расчетов повышается. Наличие методической погрешности обусловлено использованием приближенных зависимостей для определения среднего времени ожидания заявок в узлах сети с неэкспоненциальными входящими потоками заявок, коэффициентов вариации в узлах композиции и выходящих из узлов обслуживания потоков заявок, а также использованием итерационной процедуры для определения коэффициентов вариации входящих потоков заявок в узлах сетевой модели.

Предложенный метод позволяет получить точные значения характеристик обслуживания заявок в следующих случаях:

- для однородной разомкнутой сетевой модели, в которую поступает простейший поток заявок, при длительностях обслуживания заявок в узлах, распределенных по экспоненциальному закону;
- для неоднородной разомкнутой сетевой модели с приоритетами, в которую поступают простейшие потоки заявок, при длительностях обслуживания заявок разных классов в пределах одного узла, распределенных по экспоненциальному закону с одним и тем же средним значением.

Пример реализации метода

Рассмотрим разомкнутую сетевую модель звена передачи данных МКС, содержащую три узла: центральный узел 1, отображающий работу приоритетного маршрутизатора, и периферийные узлы 2 и 3, отображающие каналы связи, выходящие из узла передачи данных. Пусть в МКС передаются пакеты трех классов, которым в модели соответствуют заявки трех классов, поступающие в сеть с интенсивностями $\lambda_1(0) = 0,01c^{-1}$ и $\lambda_2(0) = \lambda_3(0) = 0,05c^{-1}$. Заявки первого класса в процессе обработки в сети после обслуживания в узле 1 могут перейти только в узел 2, а заявки второго и третьего классов – в узлы 2 и 3, причем вероятности передач равны: $p_1(1,0) = 0,005$; $p_1(1,2) = 0,995$; $p_2(1,0) = 0,02$; $p_2(1,0) = 0,02$; $p_2(1,2) = 0,58$; $p_2(1,3) = 0,40$; $p_3(1,0) = 0,01$; $p_3(1,2) = 0,09$; $p_3(1,3) = 0,90$. Сред-

ние длительности обслуживания заявок в узлах сети задаются следующими значениями: $b_1(1) = 0,05$ с; $b_2(1) = 0,2$ с; $b_3(1) = 0,04$ с; $b_h(2) = b_h(3) = 0,1$ с ($h = 1, 2, 3$).

В таблице приведены средние значения времени пребывания U_1, U_2, U_3 пакетов классов 1, 2, 3 в сети для различных значений коэффициентов вариации потоков $\alpha_h(0)$ и длительностей обслуживания $\beta_h(j)$ пакетов в узлах $j = 1, \dots, n$ ($h = 1, 2, 3$) при использовании ДО без приоритетов (ДО БП), ДО с абсолютными приоритетами (ДО АП) и ДО СП, заданной МП вида

$$Q = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 0 & 0 \end{array}.$$

Средние значения времени пребывания (доставки) пакетов [с]

ДО	$\alpha_h(0)=1; \beta_h(j)=1$			$\alpha_h(0)=0,5; \beta_h(j)=0,5$			$\alpha_h(0)=0; \beta_h(j)=0$		
	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3
БП	163,0	49,5	86,7	102,1	33,6	53,2	81,1	28,1	41,5
АП	43,2	34,5	169,7	37,6	25,6	98,1	35,7	22,6	73,9
СП	65,2	34,5	164,5	49,3	25,4	94,2	43,9	22,3	70,4

Рассчитанные средние значения времени пребывания в сетевой модели соответствуют средним значениям времени доставки пакетов от одного выделенного узла МКС до другого.

Заключение

Разработанный приближенный аналитический метод расчета моделей МКС, представляемых в виде приоритетной СеМО, позволяет лишь оценить значения характеристик функционирования сети, при этом результаты могут иметь большую погрешность. Оценка погрешности разработанного метода расчета с использованием имитационного моделирования показала, что погрешность характеристик в области больших нагрузок (свыше 0,75) не превышает 20%, а в области нагрузок от 0,2 до 0,5 может достигать 45%. В последнем случае для повышения достоверности результатов следует применять комбинированный метод моделирования, основанный на сочетании аналитических и имитационных методов [6].

Литература

1. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979. 600 с.
2. Основы теории вычислительных систем / С.А. Майоров, Г.И. Новиков, Т.И. Алиев, Э.И. Махарев, Б.Д. Тимченко. М.: Высшая школа, 1978. 408 с.
3. Marshall K. T. Some inequalities in queuing. Operations Research. 1968. Vol. 16. P. 651–655.
4. Алиев Т. И. Характеристики дисциплины обслуживания заявок со смешанными приоритетами // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1981. № 11. С. 36–40.
5. Kramer W., Langebach-Belz M. Approximate formulae for the delay in the queueing system GI/G/1. ITC-8, Melbourne, 1976. P. 121–132.
6. Алиев Т. И., Никульский И. Е., Пяттаев В. О. Моделирование ядра мультисервисной сети с относительной приоритизацией неоднородного трафика // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, выпуск 04(62). СПб, 2009. С. 88–96.

СИСТЕМА МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С НЕСКОЛЬКИМИ КЛАССАМИ
ЗАЯВОК И ПОТЕРЯМИ НА ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ КАНАЛА

А. Б. Осипов (Омск)

На вход системы массового обслуживания (СМО) поступают заявки n типов с интенсивностями $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. СМО имеет один канал, который обслуживает заявки за время $x_1, x_2, \dots, x_n$ соответственно. Обслуживание происходит в режиме «без потерь», т. е. все поступающие заявки в случае занятости канала ожидают его освобождения в очереди. Заявки обслуживаются в соответствии с дисциплиной FIFO [1]. Для перехода от обслуживания заявки i -го класса к обслуживанию заявки j -го класса ($i \neq j$) канал затрачивает дополнительное время s на операцию *переключения*. Схема СМО представлена на рис. 1.

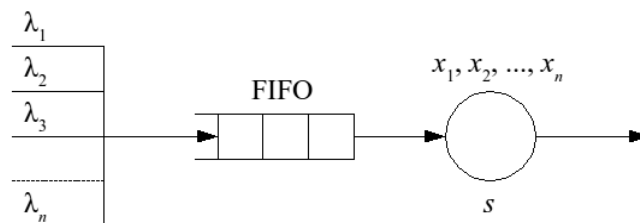


Рис. 1. СМО с несколькими классами заявок и потерями на переключении канала

Подобной СМО можно представить многие практические задачи, в которых устройство (канал) перед началом обслуживания нового типа заявок должно быть некоторым образом подготовлено. Примерами таких задач являются (в скобках указана операция, соответствующая этапу подготовки):

- конвейерная сборка изделий разных типов (настройка сборочного робота);
- стрельба по мишеням (прицеливание по мишени);
- считывание данных из разных областей жесткого диска (перемещение механизма доступа к началу области).

При $s = 0$ коэффициент загрузки такой СМО равен сумме коэффициентов загрузки по каждому из потоков:

$$R_0 = \sum_{i=1}^n \rho_i. \quad (1)$$

Загрузка СМО со стороны каждого отдельного потока вычисляется по классической формуле [2]:

$$\rho = \lambda \cdot x. \quad (2)$$

В случае $s > 0$ часть рабочего времени канал находится в фазе *переключения*, что приводит к увеличению общего коэффициента загрузки СМО.

Можно показать, что полное значение коэффициента загрузки для СМО с потерями на переключении канала вычисляется по формуле:

$$R = R_0 + s \cdot \sum_{i=1}^n \min(\lambda_i, \Lambda - \lambda_i), \quad (3)$$

$$\text{где } \Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (4)$$

В формуле (3) первое слагаемое характеризует загрузку канала *основной* работой по обслуживанию заявок, а второе слагаемое – загрузку канала, связанную с затратами на его *переключение* в случае, когда тип следующей заявки отличается от типа предыдущей. Характерно, что второе слагаемое зависит только от интенсивностей поступления заявок λ_i и не зависит от времени их обслуживания x_i .

Чтобы показать влияние взаимной величины интенсивностей поступления заявок на общую загрузку системы, проведем следующий аналитический эксперимент. В формуле (3) примем $R_0 = \text{const}$, $\Lambda = \text{const}$ и будем изменять значение λ_k , $1 \leq k \leq n$. Так как по условию $\Lambda = \text{const}$, изменение λ_k приведет к пропорциональному изменению остальных значений λ :

$$\lambda_i = (\Lambda - \lambda_k) / (n - 1), i \neq k. \quad (5)$$

Кроме того, для удовлетворения условия $R_0 = \text{const}$, учитывая (1) и (2), потребуется пропорционально изменять время обслуживания заявок x_i , что в общем случае нежелательно, так как это приведёт к нарушению исходных пропорций между x_i и s . Для сохранения указанных пропорций можно ввести дополнительную величину – *производительность* канала μ , а для характеристики *времени обслуживания* заявок и *времени переключения* использовать понятие *трудоемкости* соответствующих операций:

$$x_i = \theta_i / \mu, \quad (6)$$

$$s = \theta_s / \mu, \quad (7)$$

где θ_s – трудоемкость операции переключения; θ_i – трудоемкость обслуживания заявок i -го типа.

Подставив (2) и (6) в (1), получим:

$$R_0 = \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{\mu} \cdot \lambda_i, \quad (8)$$

откуда можно выразить μ :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i \cdot \lambda_i}{R_0}. \quad (9)$$

Таким образом, задавшись конкретными значениями R_0 , Λ , $\theta_1 - \theta_n$, θ_s , используя формулы (3), (5), (7) и (9), можно построить график зависимости $R(\lambda_k)$. График, полученный для параметров, указанных в таблице, при $k = 2$ и $\lambda_2 \in [0; 9]$ показан на рис. 2. На этом же рисунке по правой шкале показана зависимость $\mu(\lambda_k)$.

Исходные параметры эксперимента

Параметр	n	R_0	Λ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_s
Значение	3	0,5	9	6	2	3	2

График зависимости $R(\lambda_2)$, изображенный на рис. 2, имеет «излом» в точке $\lambda_2 = 4,5$. Возрастание *загрузки* R слева от этой точки обусловлено постоянно убывающей *производительностью* канала $\mu(\lambda_2)$ и, как следствие, возрастающим *временем переключения* s . Падение *загрузки* справа от точки излома идет в разрез с возрастанием *времени переключения*. Учитывая введенные ограничения ($R_0 = \text{const}$, $\Lambda = \text{const}$), такое

падение загрузки R возможно лишь в случае сильного уменьшения значения суммы минимумов в формуле (3).

Характерно также, что $R(\Lambda) = R_0$. В этом случае интенсивности прочих потоков равны нулю, и фаза *переключения* канала никогда не наступает, так как фактически в систему поступают заявки только одного типа.

Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о том, что в рассматриваемых СМО влияние на загрузку системы, вызванную потерями на переключении канала, оказывают не только абсолютные значения интенсивностей входных потоков, но и их значения относительно друг друга.

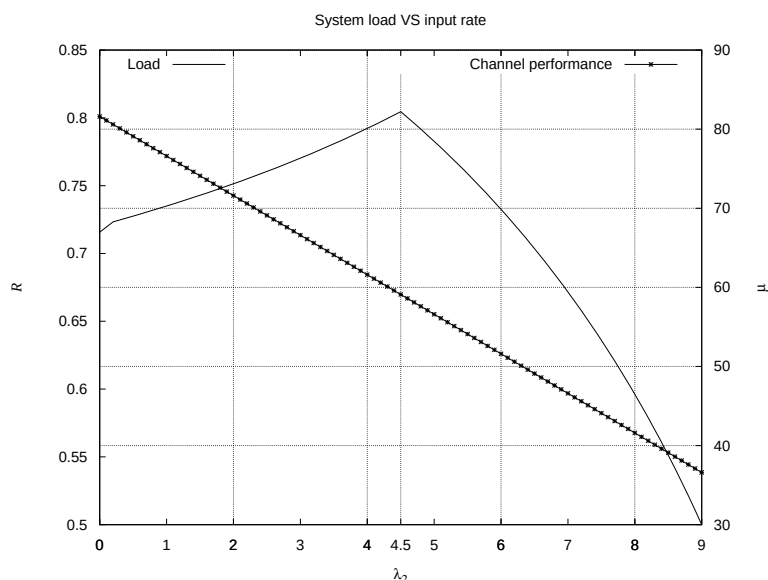


Рис. 2. Влияние взаимных значений интенсивностей на загрузку СМО

Кроме того, можно показать, что сумма минимумов в формуле (3) всегда сходится к одной из двух величин:

$$\sum_{i=1}^n \min(\Lambda - \lambda_i, \lambda_i) = \Lambda, \text{ если } \forall k \lambda_k \leq \frac{\Lambda}{2}, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \min(\Lambda - \lambda_i, \lambda_i) = 2(\Lambda - \lambda_k), \text{ если } \exists k \lambda_k > \frac{\Lambda}{2}. \quad (11)$$

График $R(\lambda_2)$ на рис. 2 левее точки излома $\lambda_2 = \Lambda / 2 = 4,5$ соответствует выражению (10), правее этой точки — выражению (11). Таким образом, влияние фазы *переключения* на загрузку СМО можно уменьшить за счет подбора таких интенсивностей входных потоков, чтобы выполнялось условие $\exists k \lambda_k > \Lambda / 2$. Чем данное неравенство сильнее, тем меньшее влияние на загрузку СМО оказывают потери на операции *переключения* канала.

Справедливость формулы (3) и выражений (10)–(11) можно проверить с помощью имитационного моделирования.

Построение имитационной модели СМО типа D|D|1 на языке GPSS не представляет сложности и может быть выполнено согласно [3]. Модель СМО с несколькими классами заявок и потерями на переключении канала отличается от нее:

- наличием нескольких входных потоков заявок (не менее двух);
- необходимостью отслеживания номера потока последней выполненной заявки.

Каждому входному потоку заявок соответствует следующий фрагмент кода на GPSS:

```

GENERATE V$GEN1,0
QUEUE 1
SEIZE 1
DEPART 1
TEST NE X$FLOW,1,SKIPPREP1
ADVANCE V$SETTIME,0
SKIPPREP1
SAVEVALUE FLOW,1
ADVANCE V$TIME1,0
RELEASE 1
TERMINATE 1

```

Сохраняемая величина FLOW используется для хранения типа заявки, занимающей канал. Начальное значение этой величины равно нулю и не совпадает ни с одним типом. При освобождении канала величина FLOW не изменяется и, таким образом, хранит тип последней обслуженной заявки.

В блоке TEST тип пришедшей заявки сравнивается со значением из FLOW. Если типы заявок отличаются, то выполняется следующий блок – ADVANCE, который задерживает движение заявки на время V\$SETTIME, моделируя тем самым фазу переключения канала на обслуживание заявок другого типа. Если же типы заявок совпадают, то заявка пропускает первый блок ADVANCE и переходит к метке SKIPPREP1.

Блок SAVEVALUE записывает тип заявки в сохраняемую величину FLOW, после чего заявка попадает во второй блок ADVANCE, который моделирует этап обслуживания заявки.

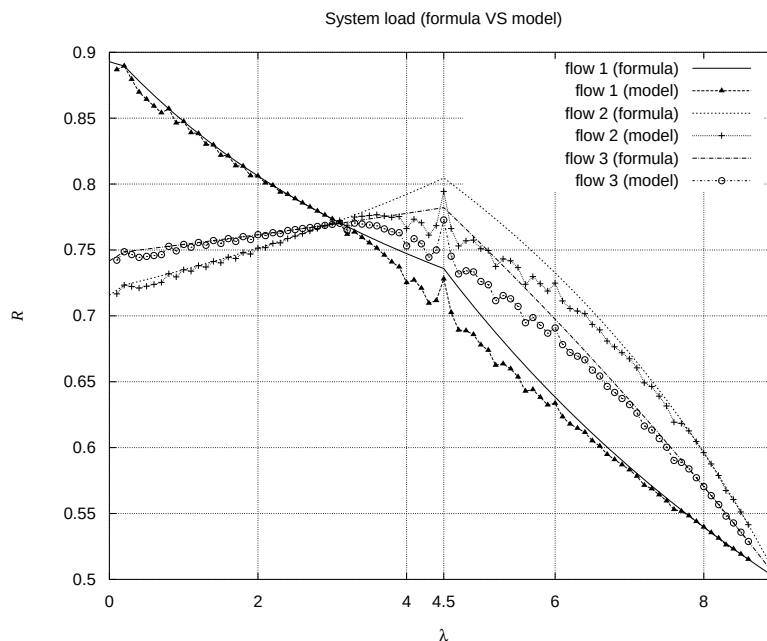


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования

Переменные V\$GEN1, V\$TIME1 и V\$SETTIME соответствуют значениям $1/\lambda_1$, x_1 и s . Аналогичные переменные используются и для всех остальных потоков заявок.

С использованием построенной модели была проведена серия имитационных экспериментов по измерению коэффициента загрузки канала СМО с параметрами из таблицы. В процессе эксперимента были получены коэффициенты загрузки канала R для $\lambda_k \in [0,1;8,6], k = 1, n$.

Зависимости $R(\lambda_k)$, $k = 1..n$, построенные по результатам имитационного моделирования и по формуле (3), изображены на рис. 3.

На рисунке видна точка пересечения всех графиков при $\lambda_k = 3$. Эта точка соответствует ситуации, когда интенсивности трех входящих потоков одинаковы. Экспериментальные и аналитические значения загрузки СМО левее этой точки практически совпадают. Справа от нее значения, рассчитанные по формуле (3), незначительно превышают значения, полученные экспериментальным путём. При дальнейшем увеличении λ_k результаты вновь сходятся. Кроме того, в точке $\lambda_k = \Lambda / 2 = 4,5$ ярко выражен всплеск экспериментальных значений, которые приближаются к расчетным.

Вид зависимости, полученной с помощью формулы (3), соответствует экспериментальным данным. Абсолютные значения, полученные по формуле (3), соответствуют экспериментальным данным не на всем протяжении области определения. На тех участках, где расчетные значения не совпадают с экспериментальными, последние всегда меньше первых, что делает возможным использование выражения (3) в качестве верхней оценки коэффициента загрузки подобных СМО.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- коэффициент загрузки рассматриваемых СМО, связанный с потерями на переключении канала, определяется не только абсолютными значениями интенсивностей входных потоков, но и их отношением между собой;
- при проектировании подобных СМО следует стремиться к тому, чтобы интенсивность одного из входных потоков превышала половину общей интенсивности всех входных потоков: чем сильнее превышение, тем меньшее влияние на коэффициент загрузки СМО оказывают потери на переключении канала;
- выражение (3) может быть использовано для приблизительного расчета коэффициента загрузки СМО с потерями на переключении канала, а также в качестве оценки верхней границы этой величины;
- предложенная имитационная модель позволяет исследовать СМО с потерями на переключении канала как теоретически, так и применительно к отдельным практическим задачам.

Литература

1. Основы теории вычислительных систем / Под ред. С. А. Майорова. Учеб. Пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1978. 408 с.
2. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: Учеб. для вузов М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
3. Задорожный В. Н. Имитационное и статистическое моделирование Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. 131 с.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ****В. Ю. Осипов (Санкт-Петербург)****Введение**

Среди множества актуальных научных проблем, связанных с моделированием морских транспортных систем, важное место занимает создание интеллектуальных геоинформационных систем (ГИС) [1, 2].

Достигнутый в настоящее время уровень свидетельствует, что пока не удалось наделить морские геоинформационные системы широкими интеллектуальными возможностями.

Имеемые результаты в рамках программно-прагматического подхода к построению морских интеллектуальных ГИС существенно повысили эффективность решения многих творческих задач. Однако все эти решения носят узкоспециализированный характер и требуют существенных затрат на разработку и сопровождение соответствующего программного обеспечения.

Известны интеллектуальные ГИС на основе экспертных систем, позволяющие распознавать ряд сложных пространственно соотнесенных ситуаций, прогнозировать отдельные события, оценивать их опасность, выдавать рекомендации пользователям и решать другие задачи. К этим ГИС относятся интеллектуальные логические и аналитические системы, а также ГИС, включающие в свой состав интеллектуальные подсистемы визуального моделирования пространственных процессов. Последние ГИС находят широкое применение при необходимости проигрывания сценариев возможных действий различных надводных, подводных, наземных, воздушных объектов и оценки их последствий.

К сожалению, все эти ГИС обладают не достаточной гибкостью к перестройке своей структуры в зависимости от внешних условий. Они требуют постоянного сопровождения со стороны экспертов и программистов, обладают низким уровнем самообучения. Интеллектуальные возможности этих систем ограничены наборами заранее заложенных и запрограммированных правил.

Активно развиваемое бионическое направление создания морских интеллектуальных ГИС, связанное с воспроизведением структур и процессов, характерных человеческому мозгу и использование их для решения геоинформационных задач, пока также не дало желаемых результатов.

Известны нейронные сети [3–5], входящие в состав интеллектуальных ГИС, применяемые для ассоциативного запоминания информации, нелинейного прогнозирования и моделирования, обработки информации об объектах и процессах. Среди них нейронные сети прямого распространения, рекуррентные структуры, самоорганизующиеся карты Кохонена и другие.

К недостаткам этих сетей относятся существенно ограниченные возможности по обработке различных видов сигналов, их распознаванию, запоминанию, извлечению из памяти сети. Имеет место быстрое размывание структур сигналов в сетях. Эти сети не позволяют в полной мере реализовать искусственное мышление и обеспечить решение одной и той же сетью различных интеллектуальных задач.

Несмотря на это, именно на бионическое направление сейчас возлагают большие надежды в части создания морских интеллектуальных ГИС. Основные достоинства этого направления, определяющие его перспективность, – это большой скрытый потенциал нейронных сетей, высокий параллелизм обработки информации, а также возможность замены дорогостоящей разработки программного обеспечения для ГИС их прямым обучением, включая самообучение.

Нужны морские ГИС, наделенные свойствами восприятия окружающей действительности, искусственного мышления, осознанного поведения и взаимодействия с внешним миром.

Рассматривается новый подход к построению морских ГИС на основе ассоциативных интеллектуальных машин [6, 7], позволяющий расширить их функциональные возможности.

Постановка задачи

Имеется некоторая традиционная морская ГИС, включающая в свой состав базу соответствующих пространственно соотнесенных данных, графический пользовательский интерфейс и ГИС инструменты. В интересах расширения возможностей в эту ГИС планируется включить специальную ассоциативную интеллектуальную машину (АИМ).

Эта машина должна:

- дополнять слои электронной карты недостающей информацией о морских транспортных системах;
- распознавать геоинформационные объекты и ситуации, определять их важность, опасность;
- прогнозировать развитие событий на море и в портах на электронных картах;
- выдавать рекомендации по действиям в сложившихся условиях;
- восстанавливать предшествующие события;
- взаимодействовать с внешними источниками информации;
- управлять настройками ГИС и решать другие задачи.

Необходимо определить структуру такой ассоциативной интеллектуальной ГИС и самой АИМ в интересах моделирования морских транспортных систем.

Структура перспективной морской ГИС

Обобщенная структура предлагаемой ГИС приведена на рис. 1, где ДИ – датчики информации; ИС – исполнительные средства. Особенность ассоциативной интеллектуальной машины в составе ГИС в том, что между ее входами и выходами могут быть установлены однозначные соответствия. В качестве нейронной сети машины выступает рекуррентная сеть с обратными связями, замыкающими двухслойные контуры с временем задержки единичных образов, меньшим времени невосприимчивости нейронов после их возбуждения. Структура ее приведена на рис. 2. В этой сети осуществляются управляемые сдвиги совокупностей единичных образов вдоль слоев в зависимости от их состояний и обеспечивается приоритетность коротких связей между нейронами.

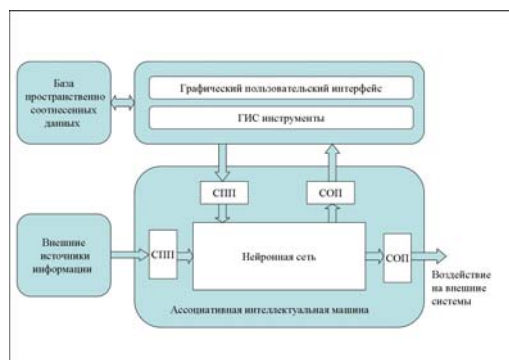


Рис. 1. Обобщенная структура ассоциативной интеллектуальной ГИС

Полагается, что датчики реализуют функции биологических клеток – рецепторов и первичных нейронов, входящих в рецепторную систему. В общем случае датчики воспринимают информацию, как о состоянии внешнего мира, ГИС и самой АИМ.

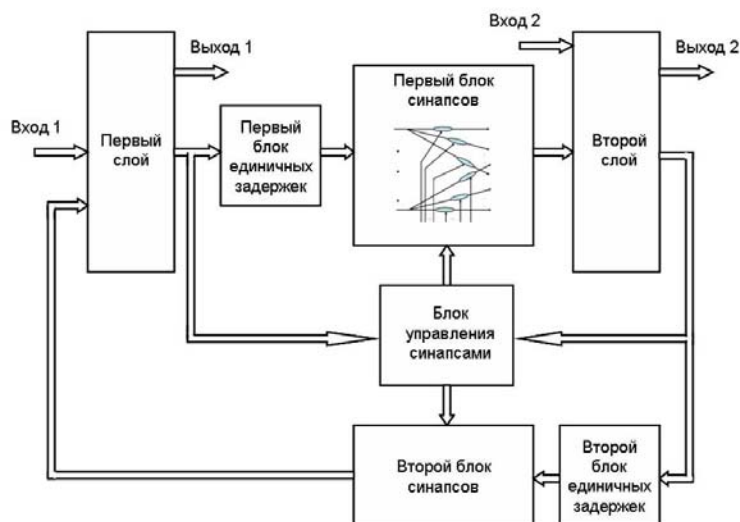


Рис. 2. Структура нейронной сети

Для решения задач, поставленных перед АИМ, помимо успешного прямого и обратного преобразования сигналов в ней, ее нейронная сеть должна иметь соответствующую логическую структуру слоев.

Продольные сдвиги в нейронной сети АИМ ГИС предлагается реализовывать только в случаях, когда между взаимодействующими нейронами при передаче совокупностей единичных образов по коротким связям возникают конфликты. Нейроны сети могут находиться в состояниях ожидания возбуждения, возбуждения и невосприимчивости. За счет постоянных по величине сдвигов совокупностей единичных образов каждый слой сети логически разбивается на одинаковые поля. Информация в сеть вводится через первое поле входного – выходного слоя, а снимается с выходного поля. При этом вводимые в сеть последовательные совокупности единичных образов за счет сдвигов приводятся в ней к одному моменту времени и ассоциируют друг друга. Несмотря на сдвиги совокупностей единичных образов вдоль слоев, в такой сети за счет приоритетности коротких связей устанавливается однозначное соответствие между ее входами и выходами. Входное и последующие поля слоев сети можно рассматривать как состояния некоторой электронной карты на текущие моменты времени с привязкой к географическим координатам. Входные сигналы в виде последовательных совокупностей единичных образов подаются на первое поле первого слоя, продвигаются по сети в указанных направлениях, ассоциируются друг с другом. При этом входные последовательные совокупности единичных образов преобразуются в параллельные, а снимаются с сети после ассоциаций снова как последовательные. Имеет место логическая структура в виде бегущей строки (рис. 3). Вид сверху на первый слой такой сети показан на рис. 4.

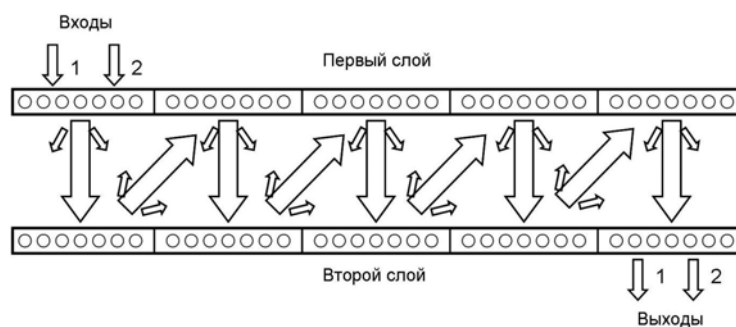


Рис. 3. Логическая структура двухслойной рекуррентной сети в виде бегущей строки

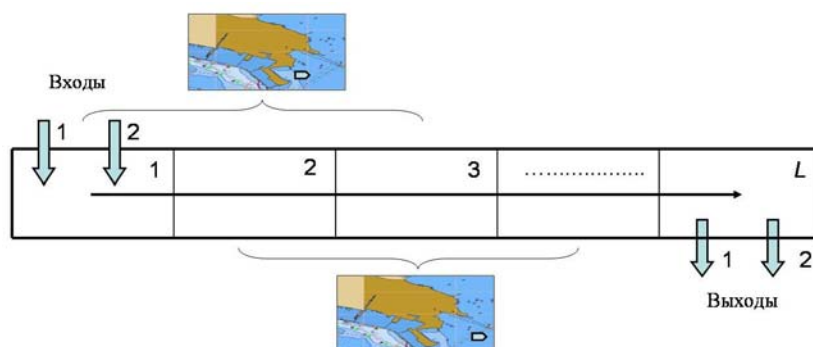


Рис. 4. Вид сверху на первый слой

Для одновременной обработки информации об m последовательных цветных кадрах используемая нейронная сеть должна иметь не менее $L = n \times m$ полей, где n – минимальное число полей, несущих информацию об одном кадре заданного качества. Заметим, что в общем случае одни и те же поля нейронной сети несут информацию о различных кадрах.

К наиболее перспективным рекуррентным нейронным сетям в составе интеллектуальных ГИС следует отнести сети не с линейными, а со спиральными структурами.

Результаты моделирования. Моделировалась одновременная обработка пространственно-временных и временных процессов в такой ГИС.

Установлено, что предлагаемый подход к построению ассоциативных интеллектуальных ГИС, как средств моделирования морских транспортных систем, позволяет успешно осуществлять интеграцию разнородной динамической информации, более полно ассоциировать текущие и запомненные события, прогнозировать их развитие с отображением результатов в исходном виде, выявлять скрытые закономерности. За счет внедрения в состав морских ГИС ассоциативных интеллектуальных машин достигнимо существенное расширение их функциональных возможностей. Подход не требует постоянного совершенствования программного обеспечения ГИС, так как базируется на самообучении.

Литература

1. **Paliulionis V.** Integration of GIS and expert systems. Databases and information systems. Kluwer Academic Publishers Norwell, MA, USA, 2001.
2. **Popovich V., Claramunt C., Osipov V., Wang T., Ray C., Berbenev D.** Integration of Vessel Traffic Control Systems and Geographical Information Systems. REAL CORP 2009. Proceedings. ISBN: 978-3-9502139-7-3. 25–25 April 2009.
3. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1103 с.
4. **Kohonen T.** Self-Organizing Maps, 3rd ed. Information Sciences. Berlin Heidelberg, Springer 2001.
5. **Villmann T., Merenyi E., Hammer B.** Neural maps in remote sensing image analysis / Neural Networks 16 (2003) 389 – 403.
6. **Осипов В. Ю.** Ассоциативная интеллектуальная машина // Информационные технологии и вычислительные системы. 2010. №2.
7. **Осипов В. Ю.** Прямое и обратное преобразование сигналов в ассоциативных интеллектуальных машинах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №7.

**АГРЕГАТИВНО-ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ
УПРАВЛЯЕМОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ КАТАСТРОФОУСТОЙЧИВОЙ
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ (КАИС)*****А. Н. Павлов (Санкт-Петербург)****Введение**

Широкое распространение при решении задач обеспечения катастрофоустойчивости информационных систем в рамках теории управления структурной динамикой (УСД) получил такой вариант управления структурами КАИС, как *реконфигурация*.

Реконфигурация КАИС – это процесс изменения структуры (структур) КАИС в целях сохранения и в последующем восстановления (повышения) уровня работоспособности КАИС либо обеспечения минимального снижения уровня эффективности применения КАИС при деградации её функций [1].

Стандартная (классическая) технология реконфигурации КАИС при отказе одного из её ресурсов включает в себя следующие основные шаги.

Шаг 1. Определение и анализ момента времени и места отказа ресурса, снятие с решения задачи, выполняемой на данном ресурсе, передача задачи на другой ресурс (с сохранением / без сохранения полученных промежуточных результатов).

Шаг 2. Исключение отказавшего ресурса из конфигурации ИВС, попытка замены его однотипным резервным либо резервным другого типа, но с близкими функциональными возможностями.

Шаг 3. Исключение связей с отказавшим ресурсом, запрет на доступ к нему, а для самого отказавшего ресурса – попытка его восстановления.

В том случае, если на отказавшем ресурсе решалась высокоприоритетная задача, которая при передаче на другие ресурсы начинает конфликтовать с задачами, закреплёнными за данным ресурсом, то в зависимости от дисциплины обслуживания происходит прерывание выполнения менее приоритетных задач либо просто их снятие с решения. Таким образом, в рамках стандартной реконфигурации при отказах и нарушениях правильности функционирования соответствующего сложного технического объекта (в нашем случае КАИС) с целью сохранения наиболее приоритетных функций указанного объекта или допустимых условий работоспособности “жертвуют” другими функциями или частью работоспособных элементов.

Данную реконфигурацию в ряде случаев называют «*слепой реконфигурацией*», так как в ходе её реализации, как правило, не проводятся следующие операции: учёт и анализ текущих характеристик решаемых в КАИС задач и выполняемых функций; анализ и оценивание текущего состояния КАИС в целом; оперативный расчёт, оценивание и анализ целевых и информационно-технических возможностей КАИС для обоснованного перераспределения функций КАИС между её работоспособными элементами и подсистемами.

Согласно результатам проведенного анализа при создании перспективных КАИС целесообразно перейти от узкой (традиционной) интерпретации процессов реконфигурации рассматриваемых систем к их широкой интерпретации в рамках развиваемой новой прикладной теории УСД КАИС [1]. Далее процесс реконфигурации (в широком смысле) в отличие от «слепой» реконфигурации будем называть *управляемой реконфигурацией* КАИС.

Вместе с тем, при решении задач обеспечения функциональной устойчивости информационно-вычислительных и управляющих систем, обеспечения целостности и

* Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-07-00311-а, 10-08-90027-Бел-а, 11-08-00767-а), ОНИТ РАН (проект №О-2.3/03).

управляемости информационными ресурсами остается открытым множество концептуальных проблем, связанных с управлением их структурной динамикой при различных сценариях деградации перечисленных систем, проблем комплексного оценивания и прогнозирования рисков возникновения нештатных и критических ситуаций, рисков выбора и реализации соответствующих управленческих решений и т. п. [1].

Учет этих и целого ряда других специфических особенностей процессов управления сложными техническими объектами в чрезвычайных и катастрофических ситуациях требует разработки *принципиально новых моделей, методов и алгоритмов многокритериального оценивания, анализа и выбора структур КАИС для повышения оперативности, обоснованности и устойчивости управления реконfigurацией указанных систем.*

Проблемы моделирования управляемой реконfigurации КАИС

В ходе моделирования управляемой реконfigurации КАИС будем учитывать следующие *предположения*.

Анализ структурной динамики КАИС показывает, что, как правило, *структуры КАИС не изменяются непрерывно, а являются постоянными на некоторых временных интервалах (первое предположение)*. В дальнейшем будем предполагать, что заданный интервал времени $T = (t_0, t_f]$, на котором проводится УСД КАИС, можно разбить на некоторое число L подынтервалов $T = \{(t_0, t_1], (t_1, t_2], \dots, (t_{k-1}, t_k], \dots, (t_{L-1}, t_L = t_f]\}$ постоянства структуры КАИС. В каждом подынтервале $T_k = (t_{k-1}, t_k]$ КАИС находится в неизменном состоянии $S_{v_k} \in S$.

Необходимо отметить, что решение задачи УСД КАИС (в частности, управления реконfigurацией КАИС) даже с учетом указанного предположения представляет собой исключительно сложную проблему. Вместе с тем следует подчеркнуть, что создание управляемой реконfigurации КАИС ведется из предположения (**второе предположение**), что катастрофа в отличие от отказа (события возможного, прогнозируемого, вероятного) – это событие возможное, но невероятное, либо вероятность которого мала и не может быть обоснованно оценена в процессе проектирования.

Природа неопределённости возмущающих факторов может носить стохастическую и не стохастическую природу. Наиболее перспективным путём учёта факторов неопределённости (возмущающих факторов) в моделях управляемой реконfigurации КАИС является путь, в котором комплексно используются все адекватные способы и формы представления данных факторов. При этом комплексное исследование возможностей по управлению реконfigurацией КАИС включает в себя как оценивание функционирования КАИС в нормальных режимах, так и оценивание возможного поведения системы в экстремальных ситуациях, приводящих к катастрофическим последствиям.

В этом случае исследование управляемой реконfigurации КАИС должно включать в себя следующие направления [1–7]: выявление всех возможных вариантов сценариев изменения внешней обстановки, в которых может применяться КАИС, включая экстремальные ситуации и воздействия, могущие вызвать катастрофические последствия, связанные с этими ситуациями; анализ поведения КАИС в обычных условиях функционирования на основе априорной вероятностной информации (если такая имеется); проведение имитационного моделирования, обработки экспертной информации с использованием теории субъективной информации и теории нечётких множеств и мер, теории возможностей; формирование гибких способов применения функциональных элементов (ФЭ) и подсистем КАИС на временных интервалах структурного постоянства для решения задач приёма поступающей информации, хранения, обработки и передачи полученной информации, формирования управляющих воздействий; планирование и управление системой объектов обслуживания, других ФЭ; нахождение гаранти-

рованных оценок результатов функционирования КАИС для всех основных экстремальных ситуаций; нахождение обобщённых (интегральных) оценок эффективности управления реконfigurацией КАИС.

Особенность постановки задачи управления реконfigurацией КАИС в первую очередь связана с тем, что совокупность частных показателей $F(S_v) = (F_1(S_v), F_2(S_v), \dots, F_H(S_v))$, характеризующих различные свойства КАИС, может быть декомпозирована на две группы показателей (третье предположение):

- структурно-топологические показатели;
- структурно-функциональные показатели.

Следует отметить, что многокритериальная неопределенность рассматриваемой задачи реконfigurации КАИС обуславливает необходимость использования соответствующих методов решения задач многокритериального выбора. Основу таких методов составляет доопределение (уточнение) задачи путем привлечения дополнительной качественной и количественной информации о свойствах критериальных функций, об альтернативах, о принципах оптимальности и т.п., что позволит построить результирующее отношение предпочтения (интегральный показатель информационно-технологических возможностей КАИС).

Помимо указанных особенностей при исследовании структурной динамики КАИС (в частности, реконfigurации КАИС) важным и неотъемлемым условием изучения возможностей КАИС является проведение анализа и оценивания архитектуры структурных состояний КАИС. Один из возможных подходов к изучению структурных состояний КАИС – таксономия структур, базирующаяся на таких понятиях, как «однородность–неоднородность», «равноценность–неравноценность», «монотонность–немонотонность». При данном подходе можно считать, что информационная система (ИС) однородна, если все включенные в нее ФЭ идентичны, и неоднородна при неидентичности ФЭ. Другим критерием оценки архитектуры ИС может быть равноценность и неравноценность структурного построения. Так архитектура ИС равноценна, если потеря одного из ФЭ ИС равнозначна потере любого другого. И наоборот, архитектура ИС неравноценна, если отдельные ФЭ имеют большую ценность по отношению к другим ФЭ. Для изучения этого свойства КАИС требуется исследовать критичность входящих в ее состав ФЭ.

Кроме того, структурные модели функционирования большинства ИС корректно описываются блок-схемами, деревьями отказов и событий, графами связности, много-терминальными сетями и т.п. Однако данные структурные модели ИС могут описывать функционирование только монотонных систем. В монотонных моделях невозможно учитывать логически сложные и противоречивые связи и отношения между ФЭ, например, которые в одних структурных состояниях системы увеличивают, а в других – уменьшают показатель эффективности ее функционирования. Также монотонные модели не представляют системы, в которых одновременно функционируют элементы, часть из которых обеспечивает увеличение, например, надежности или безопасности, а другая часть является причиной возникновения отказов или аварий, т.е. оказывает противоположное, вредное влияние на безопасность системы в целом.

Приведенные особенности требуют разработки методологических основ исследования однородных и неоднородных, монотонных и немонотонных, равноценных и неравноценных КАИС.

Кроме указанных проблем, при решении задачи управления реконfigurацией КАИС, даже в условиях введенных предположений, возникают частные проблемы, вызванные следующими обстоятельствами.

Во-первых, неизвестна последовательность измененных состояний КАИС $S_0 \rightarrow S_{v_1} \rightarrow \dots \rightarrow S_{v_L}$, вызванных деструктивными воздействиями различной природы.

Во-вторых, заранее неизвестно множество промежуточных состояний $\{S_{v_k}\} \subseteq S$, входящих в указанную последовательность в реальных условиях.

И, **наконец**, неизвестна длительность интервалов постоянства структур КАИС.

Предлагаемый подход к решению задачи управления реконфигурацией КАИС

Для преодоления создавшихся трудностей предлагается применить агрегативно-декомпозиционный подход к решению задачи управления реконфигурацией КАИС, включающий в себя следующие *этапы*.

Этап 1. Разработка методологических основ исследования монотонных и немонотонных, однородных и неоднородных КАИС на основе концепции генома структурного построения объектов, логико-вероятностного и нечетко-возможностного подходов, а также разработка способов представления, анализа топологических свойств и оценивания структурных состояний КАИС с использованием концепции генома структуры системы [5, 7].

Этап 2. С учетом результатов этапа 1 и специфических особенностей задачи формирования управляющих воздействий реконфигурации КАИС реализуются следующие шаги:

Шаг 1. Многокритериальный анализ и определение критичных ФЭ КАИС, отказ которых приводит к изменению структурного состояния системы [3].

Шаг 2. Построение оптимистических и пессимистических сценариев (траекторий) структурной динамики КАИС $S^{Сцен}$, вызванных отказами критичных ФЭ [4, 7].

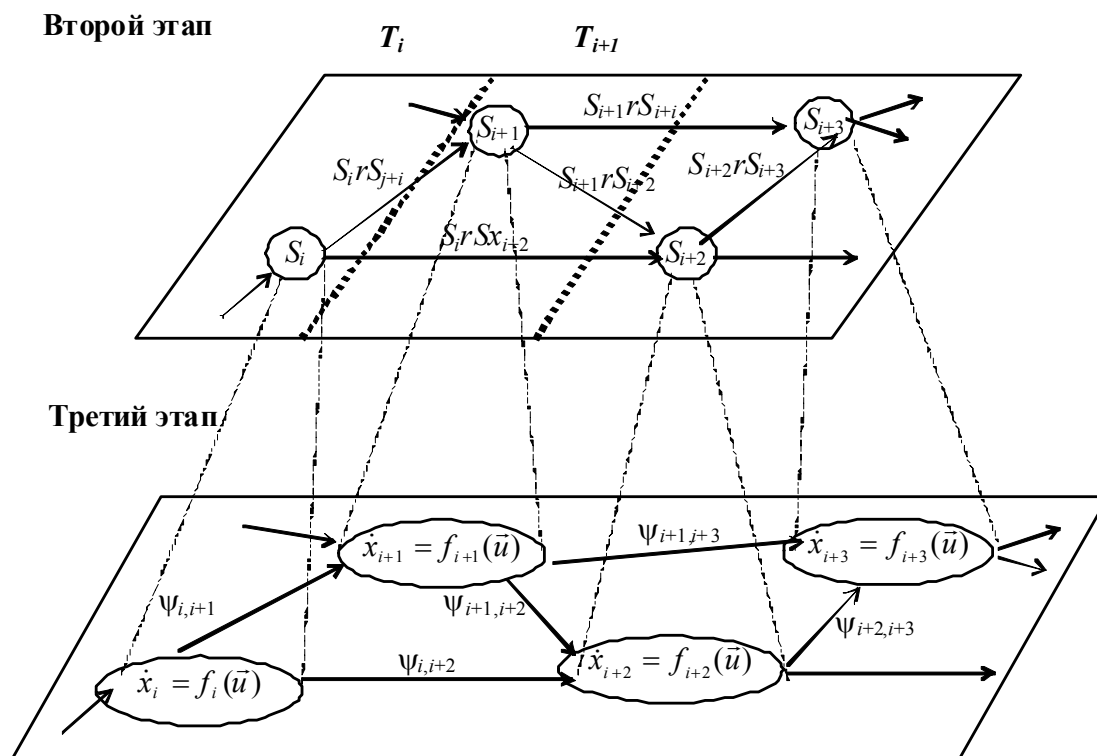
Шаг 3. На множестве $S^{Сцен}$ построение с использованием набора структурно-топологических и структурно-функциональных показателей КАИС классов (кластеров) эквивалентных траекторий структурной динамики КАИС. Внутри каждого кластера эквивалентных траекторий структурной динамики осуществляется поиск типовой (эталонной) траектории КАИС. Формируется множество эталонных траекторий структурной динамики КАИС $S^{Эталон} \subseteq S^{Сцен}$ [7].

Проведение первого и второго этапов нацелено на учет особенностей функционирования КАИС и преодоление первых двух указанных частных проблем, связанных с решением задачи реконфигурации КАИС.

Этап 3. На этом этапе для оптимистических и пессимистических эталонных сценариев структурной динамики КАИС решается задача разработки планов управляемой реконфигурации функционирования КАИС с использованием адаптивных моделей планирования операций обработки, приема–передачи и хранения информации для каждого участка структурного постоянства КАИС [6].

Этап 4. Аналитико-имитационное моделирование условий реализации планов реконфигурации КАИС с целью выявления эмерджентных свойств КАИС, не учтенных предлагаемой неформальной декомпозицией и агрегированием структурно-сложной системы. Специфические особенности использования имитационных моделей рассматриваемой задачи в первую очередь будут связаны со свойством монотонности КАИС. Для монотонных ИС в качестве имитируемых факторов реализации разработанных планов управляемой реконфигурации станут временные интервалы постоянства структурных состояний системы. В случае немонотонности ИС помимо указанных характеристик моделируемых процессов при многократных воспроизведениях следует учитывать случайные внешние воздействия на параметры, описывающие операции обработки, приема–передачи и хранения информации.

Графическая иллюстрация предлагаемого агрегативно-декомпозиционного подхода приведена на рисунке.



Графическая иллюстрация подхода

В результате проведения третьего и четвертого этапов предложенного подхода осуществляется преодоление приведенных (второй и третьей) частных проблем при решении задачи реконфигурации КАИС.

Как показывает проведённый анализ, задачи первого, второго и третьего этапов также являются достаточно сложными, но для рассматриваемой прикладной области принципиально разрешимыми.

Выводы

Сформулированы и обоснованы общие и частные требования, предъявляемые к разработке новых моделей, методов и алгоритмов многокритериального оценивания, анализа и выбора структур КАИС для повышения оперативности, обоснованности и устойчивости управляемой реконфигурации указанных систем. Анализ данных требований позволил сформулировать основные направления исследования управляемой реконфигурации КАИС, выработать этапы агрегативно-декомпозиционного подхода к решению задачи управления реконфигурацией КАИС.

Литература

1. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
2. Верзилин Д. Н., Охтилев М. Ю., Павлов А. Н., Соколов Б. В. Методологические и методические основы создания и применения катастрофоустойчивых информационных систем // Вторая Международная конференция «Системный анализ и инфор-

- мационные технологии» (САИТ-2007), г. Обнинск, 10–14 сентября, 2007: Труды конференции. Т. 2. С. 245–246.
3. **Зеленцов В. А., Павлов А. Н.** Многокритериальный анализ влияния отдельных элементов на работоспособность сложной системы // Информационно-управляющие системы. 2010, №6 (49), С. 7–12.
 4. **Осипенко С. А., Павлов А. Н., Соколов Б. В.** Динамическая реконфигурация информационных систем специального назначения // Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения. Материалы научной конференции в честь 20-летия ФГУП «Концерн “Системпром”». М.: ФГУП «Концерн “Системпром”», 2011. С. 43–44.
 5. **Осипенко С. А., Павлов А. Н.** Исследование безопасности сложных технических объектов // Известия вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53. №1 1. С. 27–31.
 6. **Павлов А. Н.** Постановка и анализ возможных путей решения задачи реконфигурации катастрофоустойчивой информационной системы // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. Т. 9. № 4. С. 15–21.
 7. **Павлов А. Н., Соколов Б. В.** Структурный анализ катастрофоустойчивой информационной системы // Труды СПИИРАН. Вып. № 8. СПб.: СПИИРАН, 2009. С. 128–151.

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ХОДА БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ****И. Ю. Паньковский, А. В. Бобин, А. В. Слатин (Москва)**

При проектировании сложных технических систем (СТС) широко используется математическое моделирование как средство создания инструментов постановки эксперимента и прогнозирования поведения всей системы или ее части в заданных условиях. Среди моделей, применяемых при проектировании вооружения, можно выделить математические модели, отражающие специфику взаимодействия конфликтующих сторон – модели боевых действий.

Предлагаемая технология построения имитационной математической модели базируется на большом опыте ГосНИИАС и лично авторов по разработке операционных математических моделей различных типов боевых действий, и прошла проверку в ходе выполнения ряда НИР и ОКР: «Гера-2», «Алгебра», «Самодержец», «Известняк», «Таганрог», «Премьер» и пр. Авторами разработана быстродействующая имитационная математическая модель (ММ) воспроизведения хода боевых действий, позволяющая с учетом цифровой карты рельефа местности и погодных условий воспроизвести функционирование:

- ◆ дежурного радиолокационного поля;
- ◆ самолетов дальнего радиолокационного обнаружения;
- ◆ радиолокационных и оптикоэлектронных средств воздушной разведки наземных целей;
- ◆ радиолокационных, оптикоэлектронных, радиотехнических и звукометрических средств наземной разведки наземных целей;
- ◆ авиационных боевых комплексов в ходе дальнего воздушного боя;
- ◆ авиационных боевых комплексов при атаке наземных целей;
- ◆ автоматизированной системы управления авиационными боевыми комплексами;
- ◆ зенитной системы ПВО.

Предлагаемая технология объединяет в себе ряд основополагающих принципов, множество алгоритмов, структуру построения и организацию вычислительного процесса. Моделирование производится путем имитации наиболее важных информационных и динамических процессов, происходящих при функционировании объектов.

Благодаря бурному развитию вычислительной техники в настоящее время широкое распространение получили имитационные модели боевых действий, в основу которых положен метод Монте-Карло. В этих моделях влияние случайных факторов учитывается при помощи генератора случайных чисел (ГСЧ), а результат вычисляется путем обработки статистических данных, получаемых при многократной реализации боя с одинаковыми начальными условиями.

В процессе моделирования изменяются параметры, характеризующие состояние сложной технической системы «свои объекты – объекты противника» (например, в момент обнаружения объекта наблюдения средством наблюдения увеличивается число объектов, наблюдаемых этим средством, и происходит формирование сообщения об обнаруженном объекте для отправки на командный пункт). Назовем событиями моменты времени, в которые происходит изменение сложной технической системы «свои объекты – объекты противника», а изменение состояния системы в момент события – реализацией события. Существует два основных подхода к имитации процесса функционирования сложной технической системы.

При первом подходе, который называется потактовым моделированием, имитация процессов, происходящих в системе, ведется с фиксированным малым шагом по времени. На каждом шаге проверяется текущее состояние системы и возможность наступления событий и при выполнении условий наступления какого-либо события производится его реализация.

При втором подходе, который называется пособытийным моделированием, имитация процессов, происходящих в системе, ведется от события к событию. Например, в момент пуска УР рассчитывается время подрыва УР и далее в момент времени, рассчитанный при пуске, разыгрывается исход подрыва БЧ УР.

Если сравнить применение этих двух подходов к имитации сложных систем, то можно сделать вывод, что пособытийное моделирование по сравнению с потактовым дает выигрыш во времени счета, однако увеличивает логическую сложность модели. Увеличение скорости расчетов объясняется тем, что каждый из моделируемых процессов воспроизводится со своим, как правило, неравномерным, шагом по времени в отличие от потактового способа моделирования, при котором такт проверки событий соответствует минимальному шагу воспроизведения процессов. Большая логическая сложность модели при событийном подходе является следствием того, что в каждом событии, как правило, необходимо проводить достаточно сложный расчет ожидаемого времени наступления следующего события, в отличие от потактового способа моделирования, при котором на каждом такте выполняется простая проверка – наступило событие или нет.

Таким образом, потактовый подход к моделированию плохо применим для решения исследовательских задач методом Монте-Карло, и практически не применим при моделировании масштабных боевых операций, поскольку требует слишком много вычислительных ресурсов. В тоже время пособытийное моделирование не обеспечивает достаточную адекватность в условиях трудно прогнозируемого характера взаимодействия сложных технических систем. С повышением точности пособытийных моделей резко возрастает логическая сложность модели и количество пересчетов (например, связанных с откатами). Поэтому данный подход не применим для моделей реального времени.

В предлагаемой комплексной имитационной модели используется смешанный подход: большая часть процессов моделируется на основе пособытийного принципа (например, в момент изменения направления движения цели аналитически рассчитывается время ее входа в зону обнаружения РЛС), однако наиболее важные и сложные динамические процессы моделируются потактово, причем шаг по времени может меняться динамически.

Скорость расчета одной реализации боевой операции на имитационной математической модели определяется количеством и типом боевых средств, участвующих в операции, а также размерностью матрицы высот и временным тактом определения прямой видимости. На компьютере, оснащенном процессором Intel Core 2 Duo с тактовой частотой 2.4 ГГц, средняя скорость расчетов составляет: при моделировании 100 объектов – в 20000÷40000 раз быстрее реального времени, а при моделировании 1000 объектов – в 200÷400 раз.

Использование событийно-потактового метода моделирования позволяет обеспечить высокое быстродействие при сохранении высокой адекватности за счет потактового моделирования наиболее важных процессов, что дает возможность значительно расширить круг решаемых моделью задач:

- анализ и отработка алгоритмов (в том числе бортовых);
- анализ и исследование эффективности функционирования СТС;
- создание рабочих мест в составе тренажерных стендов;

- работа в составе стендов полунатурного моделирования (например, для имитации внешней тактической обстановки).

Это позволяет совместить отладку и тестирование функциональных программ с отработкой и анализом заложенных в них физических принципов и алгоритмов, что позволяет сократить затраты на создание математических моделей разного уровня и время на проектирование, разработку и внедрение СТС.

Программная реализация ММ состоит из программных модулей, работающих под управлением основного модуля, обеспечивающего их взаимодействия, основные интерфейсные функции, запуск, остановку и завершение работы модели. Укрупненная блок-схема, представляющая иерархическую структуру программной реализации модели, показана на рис. 1. Основной модуль включает в себя задачу для моделирования, диспетчер модельного времени, сценарии действий моделируемых средств и ряд интерфейсов.



Рис. 1. Укрупненная блок-схема структуры модели

Диспетчер времени обеспечивает управление масштабом реального времени, организует работу очереди событий, потактовых моделей и их синхронизацию. Задача представляет собой набор исходных данных для моделирования, считанных из базы данных в оперативную память для повышения быстродействия. Она включает в себя исходное состояние поля действий и всех моделируемых объектов, их тактико-технические характеристики (ТТХ), программы поведения и условия применения. Под юнитами в программе понимаются отдельные моделируемые объекты, и их формирования (составные юниты).

Интерфейс ММ обеспечивают считывание из базы данных исходных данных для проведения расчетов и запись результатов моделирования в базу данных, взаимодействие с оператором или пользователем, синхронное отображение результатов моделирования в виде фильма.

Интерфейс мультиагентной среды обеспечивает функционирование ММ в распределенной вычислительной системе (например, в составе стенда полунатурного моделирования).

Каждый моделируемый объект (самолет, ракета, танк и т.д.) представляет собой контейнер, содержащий множество подсистем. Подсистемы отвечают за воспроизведение функционирования объекта. В состав объекта входит подсистема движения, формирующая траекторию движения (точку стояния объекта).

В зависимости от типа объекта в состав объекта могут входить:

- подсистема управления, предназначенная для сбора, обработки и отождествления информации, поступающей от других подсистем и подчиненных объектов, а также для выработки команд подсистемам объекта и другим подчиненным объектам;
- подсистемы обнаружения, предназначенные для обнаружения объектов противника;
- подсистемы поражения, предназначенные для воспроизведения функционирования бортовых подсистем оружия;
- подсистема РЭБ, предназначенная для воспроизведения процесса постановки помех по данным станции РТР;
- подсистемы связи, отвечающие за имитацию передачи и получения информации через каналы связи с другими моделируемыми объектами;
- подсистема навигации, обеспечивает объект-владелец данными о его собственном положении в глобальной системе координат.

Высокая степень унификации программного кода, используемого для моделирования достаточно большого типажа средств, участвующих в боевых действиях, достигается, в том числе, за счет построения моделируемых объектов из подсистем, имитирующих отдельные функционально независимые подсистемы реального объекта (одни и те же типы подсистем могут использоваться разными типами объектов, например, один и тот же тип подсистемы – многофункциональная РЛС – используется для разных ЗРК, которые различаются подсистемами поражения).

Достоинства модели:

- высокая адекватность, подтвержденная в ходе выполнения НИР и ОКР, достаточная для решения задач выбора технического облика и характеристик авиационных боевых комплексов таких, как характеристики и режимы работы РЛС, циклограммы работы, летно-технические характеристики РЛС, структура построения и характеристики АСУ;
- возможность воспроизведения хода боевых действий, как в заданном масштабе реального времени, так и в режиме набора статистики;
- высокое быстродействие (существенно выше реального времени);
- высокая гибкость системы формирования исходных данных, использование модульного принципа конструирования объектов;
- высокая степень унификации в структуре программного кода, использование современных принципов программирования;
- низкие затраты на адаптацию существующих алгоритмов к новым задачам, за счет отсутствия прямых перекрестных связей между отдельными подсистемами (частными моделями).

Разработанная модель боевых действий имеет практическое применение. Например, в рамках ОКР «Премьер» созданный программный комплекс используется для воспроизведения разведывательно-ударных фронтовых операций и боевых действий с участием самолета дальнего радиолокационного дозора и наведения (РЛДН) для отработки функциональных программ его бортовой информационной управляющей системы (рис. 2).



Рис. 2. Организация вычислительного процесса в случае воспроизведения разведывательно-ударных фронтовых операций и боевых действий с участием самолета РЛДН

Выводы

В работе предлагается технология построения универсальной имитационной математической модели воспроизведения хода масштабной боевой операции, включающей свыше 1000 моделируемых объектов, которые обладают индивидуальной и групповой логикой поведения. Разработанная авторами методика конструирования сложных объектов, состоящих из множества независимых подсистем, которые объединяются между собой общим интерфейсом обеспечивает высокую гибкость и простоту адаптацию системы к новым практическим приложениям и условиям работы.

Рассмотренный в данной работе программное средство имитационного моделирования обеспечивает высокое быстродействие при воспроизведении крупных боевых операций, что позволяет в сотни раз быстрее реального времени.

Разработанные методика и программные средства, основанные на применении имитационного моделирования, целесообразно использовать как при проведении исследований, связанных с поиском эффективности функционирования, так и в работах связанных с отработкой подсистем и алгоритмов в реальном масштабе времени.

Адекватность и эффективность предлагаемой технологии подтверждена успешным внедрением в ряде крупных НИР и ОКР выполненных авторами в ГосНИИАС.

Литература

1. Березнев Е. В., Вишнякова Л. В., Паньковский И. Ю., Слатин А. В. и др. Имитационная математическая модель боевых действий и средства трехмерной визуализации для отработки ФПО самолета РЛДН. Труды НТ Конференции «Актуальные вопросы создания информационно-управляющих систем, М., «Концерн радиостроения «Вега», 2011.
2. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972.
3. Крючков А. А. Моделирование боевых действий по схеме очередь событий // Оборон. Техника. 2009. № 10–11.
4. Автоматизированная система анализа эффективности зенитно-ракетного вооружения «Атлант»: Инженерная записка/ГосНИИАС, ПСК АНТЕЙ, 1999.

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ВИЧ-ИНФЕКЦИИ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ РЕКУРРЕНТНЫХ
УРАВНЕНИЙ*****Н. В. Перцев, В. Н. Леоненко (Омск)****Введение**

Одним из инструментов исследования принципов передачи и развития социально значимых заболеваний (туберкулез, СПИД и др.) являются математические модели, описывающие распространение, развитие, лечение и предотвращение этих заболеваний. Для построения моделей обычно используются системы нелинейных дифференциальных уравнений. Такие модели допускают аналитическое исследование и позволяют обрабатывать реальные данные с целью выявления основных закономерностей динамики социально значимых заболеваний (см., например, [1, 2]). Вместе с тем, применение дифференциальных уравнений для моделирования социально значимых заболеваний имеет некоторые ограничения: возникают сложности с интерпретацией решений в связи с непрерывностью переменных; зачастую не учитывается дискретность времени, связанная с суточным ритмом жизни индивидуумов и стохастическая природа контактов, приводящих к заражению восприимчивых индивидуумов. Для учета перечисленных факторов может быть использован подход, основанный на применении стохастических рекуррентных уравнений, численных методов Монте-Карло и соответствующих программ для высокопроизводительных ЭВМ. Такой подход описан, в частности, в работах [3, 4] при исследовании динамики распространения туберкулеза в регионах России.

Целью настоящей работы является построение стохастической имитационной модели, описывающей распространение ВИЧ-инфекции в неоднородной популяции и проведение вычислительных экспериментов по исследованию статистических характеристик численностей изучаемых групп населения в зависимости от вариации параметров модели.

Уравнения модели

В основу модели положены идеи и подход, предложенные в [1, 2]. В этих работах структура населения регионов России рассматривается с точки зрения степени социальной дезадаптации индивидуумов.

Следуя [1, 2], население некоторого региона представим в виде групп индивидуумов A_i , $i = 1, 2, \dots, 8$. Обозначим через $x_i(t)$ численность индивидуумов группы A_i в момент времени $t = 0, 1, 2, \dots, T$, $i = 1, 2, \dots, 8$. Система уравнений модели имеет вид:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= \hat{x}_1(t) - u_{12}(t) - u_{15}(t) + u_{21}(t) + f_1(t); \\x_2(t) &= \hat{x}_2(t) - u_{21}(t) - u_{23}(t) - u_{24}(t) - u_{26}(t) + u_{12}(t) + u_{32}(t) + u_{42}(t) + f_2(t); \\x_3(t) &= \hat{x}_3(t) - u_{32}(t) - u_{37}(t) + u_{23}(t); \\x_4(t) &= \hat{x}_4(t) - u_{42}(t) - u_{48}(t) + u_{24}(t); \\x_5(t) &= \hat{x}_5(t) + u_{15}(t) + u_{65}(t); \\x_6(t) &= \hat{x}_6(t) - u_{65}(t) + u_{26}(t) + u_{76}(t) + u_{86}(t); \\x_7(t) &= \hat{x}_7(t) - u_{76}(t) + u_{37}(t); \\x_8(t) &= \hat{x}_8(t) - u_{86}(t) + u_{48}(t); \\x_i(0) &= x_i^{(0)}, i = 1, 2, \dots, 8; t = 1, 2, \dots, T.\end{aligned}$$

* Работа поддержана РФФИ (проект № 09-01-00098-а) и СО РАН (проект № 26).

В этой системе уравнений A_1 – социально адаптированные индивидуумы, восприимчивые к ВИЧ, A_2 – восприимчивые к ВИЧ индивидуумы с высоким риском развития патологии, A_3 – восприимчивые к ВИЧ индивидуумы с установленным хроническим алкоголизмом, A_4 – восприимчивые к ВИЧ индивидуумы с установленной наркотической зависимостью, A_5 – социально адаптированные индивидуумы, инфицированные ВИЧ, A_6 – инфицированные ВИЧ индивидуумы с высоким риском развития патологии, A_7 – инфицированные ВИЧ индивидуумы с установленным хроническим алкоголизмом, A_8 – инфицированные ВИЧ индивидуумы с установленной наркотической зависимостью.

Слагаемые $f_i(t) \geq 0, i = 1, 2$, отражают приток населения в соответствующие группы за промежуток времени $(t-1, t]$ и представляют собой некоторые случайные процессы с заданными вероятностными характеристиками. Случайные величины $\hat{x}_j(t)$ означают количество индивидуумов группы A_j , доживших от момента времени $t-1$ до момента времени t ; случайные величины $u_{jk}(t)$ описывают количество индивидуумов, переходящих из группы A_j в группу A_k в течение промежутка времени $(t-1, t]$. Законы распределения этих величин задаются следующим образом. При фиксированном $x_j(t-1) \geq 0$ величина $\hat{x}_j(t)$ имеет биномиальное распределение с параметрами $x_j(t-1), \rho_j$, где $0 < \rho_j < 1$ – вероятность дожития индивидуума группы A_j от момента времени $t-1$ до момента времени t , $j = 1, \dots, 8$. При фиксированном $\hat{x}_1(t) \geq 0$ величина $u_{12}(t)$ имеет биномиальное распределение с параметрами $\hat{x}_1(t), \lambda_{12}$, где $\lambda_{12} \in [0; 1]$ – вероятность перехода индивидуума группы A_1 в группу A_2 . При фиксированных $\hat{x}_1(t) - u_{12}(t) \geq 0, \hat{x}_5(t) \geq 0, \hat{x}_6(t) \geq 0, \hat{x}_7(t) \geq 0, \hat{x}_8(t) \geq 0$ величина $u_{15}(t)$ имеет биномиальное распределение с параметрами $\hat{x}_1(t) - u_{12}(t), \mu_{15}(t)$, где

$$\mu_{15}(t) = 1 - \prod_{j=5}^8 (1 - r_{1j})^{\hat{x}_j(t)}$$

означает вероятность инфицирования индивидуума группы A_1 за счёт контактов с индивидуумами групп A_5, A_6, A_7, A_8 . Константа r_{1j} задает вероятность контакта одного индивидуума группы A_1 с одним индивидуумом группы A_j за промежуток времени $(t-1, t]$, $0 \leq r_{1j} < 1, j = 5, \dots, 8$. Случайный вектор $(u_{21}(t), u_{23}(t), u_{24}(t), \hat{x}_2(t) - u_{21}(t) - u_{23}(t) - u_{24}(t))$ описывается мультиномиальным законом распределения, содержащим параметры $(\hat{x}_2(t); \lambda_{21}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, 1 - \lambda_{21} - \lambda_{23} - \lambda_{24})$, где $\hat{x}_2(t) \geq 0$ фиксировано, $\lambda_{21}, \lambda_{23}, \lambda_{24} \in [0; 1]$ – вероятности переходов индивидуума группы A_2 в группы A_1, A_3, A_4 соответственно, $\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24} < 1$. Величина $u_{26}(t)$ при фиксированных $\hat{x}_2(t) - u_{21}(t) - u_{23}(t) - u_{24}(t) \geq 0, \hat{x}_5(t) \geq 0, \hat{x}_6(t) \geq 0, \hat{x}_7(t) \geq 0, \hat{x}_8(t) \geq 0$ имеет биномиальное распределение с параметрами $\hat{x}_2(t) - u_{21}(t) - u_{23}(t) - u_{24}(t),$

$$\mu_{26}(t) = 1 - \prod_{j=5}^8 (1 - r_{2j})^{\hat{x}_j(t)},$$

где константа r_{2j} означает вероятность контакта одного индивидуума группы A_2 с одним индивидуумом группы A_j за промежуток времени $(t-1, t]$, $0 \leq r_{2j} < 1, j = 5, \dots, 8$. Аналогичным образом определяются оставшиеся случайные величины.

Вектор начальных численностей $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, x_4^{(0)}, x_5^{(0)}, x_6^{(0)}, x_7^{(0)}, x_8^{(0)})$ имеет неотрицательные компоненты и описывается некоторым заданным законом распределения.

Алгоритм статистического моделирования

На каждом временном отрезке численности групп индивидуумов вычисляются путём прямого моделирования случайных величин, входящих в систему стохастических рекуррентных уравнений, и последующего вычисления значений $x_i(t)$ по значениям $x_i(t-1)$, $i = 1, 2, \dots, 8$. Для генерации используемых случайных величин применяются вычислительные методы и датчик случайных чисел, описанные в работах [5, 6].

Разработанный алгоритм реализован в виде комплекса моделирующих программ на языке C++ для персональных и высокопроизводительных ЭВМ. Параллельная версия программы создана на основе интерфейса MPI. Процедура распараллеливания основана на распределённом моделировании реализаций с последующим усреднением результатов. Для проведения расчётов использовались мощности Сибирского суперкомпьютерного центра (г. Новосибирск).

Оценки для математических ожиданий изучаемых переменных

Для применения построенной модели и планирования вычислительных экспериментов необходимо иметь априорную информацию о поведении решений системы стохастических уравнений в зависимости от набора параметров. Такую информацию можно получить с помощью анализа системы уравнений для математических ожиданий $m_i(t) = Ex_i(t)$ численностей соответствующих групп населения. Предполагая существование $Ef_1(t), Ef_2(t)$ и $m_i(0), i = 1, 2, \dots, 8$, получаем, что система уравнений для математических ожиданий имеет вид:

$$\begin{aligned} m_1(t) &= (1 - \lambda_{12})\rho_1 m_1(t-1) + \lambda_{21}\rho_2 m_2(t-1) - Eu_{15}(t) + Ef_1(t); \\ m_2(t) &= \lambda_{12}\rho_1 m_1(t-1) + (1 - \lambda_{21} - \lambda_{23} - \lambda_{24})\rho_2 m_2(t-1) + \lambda_{32}\rho_3 m_3(t-1) + \\ &+ \lambda_{42}\rho_4 m_4(t-1) - Eu_{26}(t) + Ef_2(t); \\ m_3(t) &= \lambda_{23}\rho_2 m_2(t-1) + (1 - \lambda_{32})\rho_3 m_3(t-1) - Eu_{37}(t); \\ m_4(t) &= \lambda_{24}\rho_2 m_2(t-1) + (1 - \lambda_{42})\rho_4 m_4(t-1) - Eu_{48}(t); \\ m_5(t) &= \rho_5 m_5(t-1) + \lambda_{65}\rho_6 m_6(t-1) + Eu_{15}(t); \\ m_6(t) &= (1 - \lambda_{65})\rho_6 m_6(t-1) + \lambda_{76}\rho_7 m_7(t-1) + \lambda_{86}\rho_8 m_8(t-1) + Eu_{26}(t); \\ m_7(t) &= (1 - \lambda_{76})\rho_7 m_7(t-1) + Eu_{37}(t); \\ m_8(t) &= (1 - \lambda_{86})\rho_8 m_8(t-1) + Eu_{48}(t); \\ m_i(0) &= Ex_i^{(0)}, i = 1, 2, \dots, 8; t = 1, 2, \dots, T. \end{aligned}$$

В силу нелинейности модели невозможно установить явный вид выражений для $Eu_{15}(t), Eu_{26}(t), Eu_{37}(t), Eu_{48}(t)$, однако их можно оценить сверху, используя неравенство Йенсена для математических ожиданий выпуклых функций от случайных величин. Применяя далее метод монотонных операторов [7], нетрудно построить систему верхних оценок для $m_i(t)$, которая позволяет исследовать возможные варианты динамики переменных $x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, 8$. Система верхних оценок для $m_1(t), m_2(t), \dots, m_8(t)$ может быть представлена в виде двух подсистем, первая из которых содержит только переменные $m_1(t), m_2(t), m_3(t), m_4(t)$, а именно:

$$\begin{pmatrix} m_1(t) \\ m_2(t) \\ m_3(t) \\ m_4(t) \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ 0 & b_{32} & b_{33} & 0 \\ 0 & b_{42} & 0 & b_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_1(t-1) \\ m_2(t-1) \\ m_3(t-1) \\ m_4(t-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Ef_1(t) \\ Ef_2(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned}
b_{11} &= (1 - \lambda_{12})\rho_1, \quad b_{12} = \lambda_{21}\rho_2; \\
b_{21} &= \lambda_{12}\rho_1, \quad b_{22} = (1 - \lambda_{21} - \lambda_{23} - \lambda_{24})\rho_2, \quad b_{23} = \lambda_{32}\rho_3, \quad b_{24} = \lambda_{42}\rho_4; \\
b_{32} &= \lambda_{23}\rho_2, \quad b_{33} = (1 - \lambda_{32})\rho_3; \\
b_{42} &= \lambda_{24}\rho_2, \quad b_{44} = (1 - \lambda_{42})\rho_4.
\end{aligned}$$

Принимая, что $Ef_1(t), Ef_2(t)$ ограничены для всех $t = 1, 2, \dots, T, \dots$, решения $m_1(t), \dots, m_4(t)$ первой подсистемы можно оценить сверху константами $\tilde{m}_1, \dots, \tilde{m}_4$ и подставить эти оценки в уравнения второй подсистемы:

$$\begin{pmatrix} m_5(t) \\ m_6(t) \\ m_7(t) \\ m_8(t) \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} P_1 Q_{15} + \rho_5 & P_1 Q_{16} + \lambda_{65} \rho_6 & P_1 Q_{17} & P_1 Q_{18} \\ P_2 Q_{25} & P_2 Q_{26} + (1 - \lambda_{65}) \rho_6 & P_2 Q_{27} + \lambda_{76} \rho_7 & P_2 Q_{28} + \lambda_{86} \rho_8 \\ P_3 Q_{35} & P_3 Q_{36} & P_3 Q_{37} + (1 - \lambda_{76}) \rho_7 & P_3 Q_{38} \\ P_4 Q_{45} & P_4 Q_{46} & P_4 Q_{47} & P_4 Q_{48} + \rho_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_5(t-1) \\ m_6(t-1) \\ m_7(t-1) \\ m_8(t-1) \end{pmatrix},$$

$$P_1 = (1 - \lambda_{12})\rho_1 \tilde{m}_1, \quad P_2 = (1 - \lambda_{21} - \lambda_{23} - \lambda_{24})\rho_2 \tilde{m}_2, \quad P_3 = (1 - \lambda_{32})\rho_3 \tilde{m}_3,$$

$$P_4 = (1 - \lambda_{42})\rho_4 \tilde{m}_4, \quad Q_{ij} = \rho_j \ln \frac{1}{1 - r_{ij}}, \quad i = 1, \dots, 4, \quad j = 5, \dots, 8.$$

Элементы матрицы C второй подсистемы неотрицательны. Это позволяет применить критерий асимптотической устойчивости нулевого решения системы линейных разностных уравнений [8]: если все главные миноры матрицы $I - C$ положительны (т.е. $I - C$ является невырожденной М-матрицей), то $m_i(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty, i = 5, 6, 7, 8$. Выполнение этого критерия для матрицы $I - C$ обеспечивает полное искоренение инфекции: с течением времени численности групп A_5, A_6, A_7, A_8 стремятся к нулю с вероятностью 1.

Результаты вычислительных экспериментов

На рис. 1, 2 приведены статистические оценки математических ожиданий общей численности восприимчивых ($x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) + x_4(t)$) и инфицированных ($x_5(t) + x_6(t) + x_7(t) + x_8(t)$) индивидуумов (соответственно) для двух наборов параметров. Усреднение проводилось с помощью стандартных формул математической статистики по выборкам из 1000 реализаций.

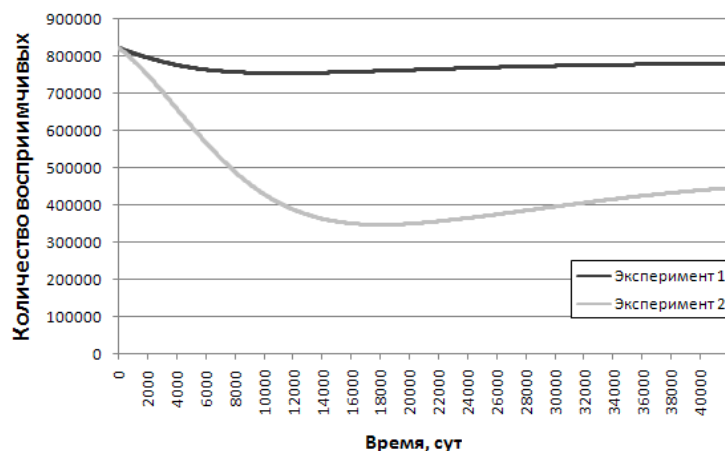


Рис. 1

Для первого набора параметров $I - C$ является невырожденной М-матрицей, что обеспечивает искоренение инфекции (эксперимент 1). Для второго набора параметров указанный для $I - C$ критерий не выполняется, оценка математического ожидания количества инфицированных индивидуумов с течением времени выходит на ненулевой стационарный уровень (эксперимент 2).

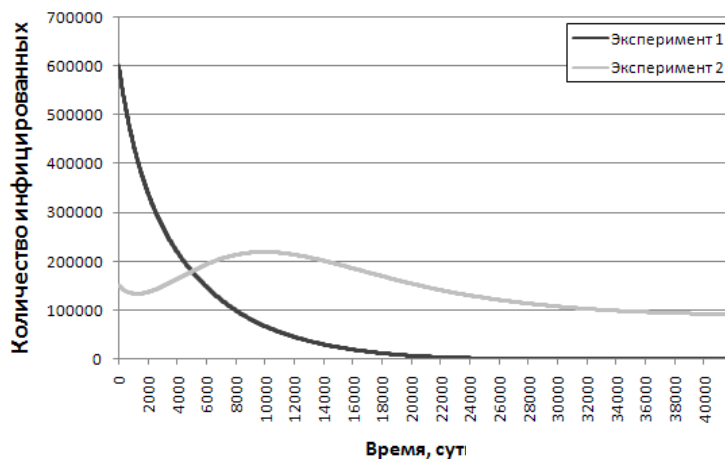


Рис. 2

Заключение

Представленные выше модель, моделирующая программа и аналитический результат допускают естественное обобщение для случая, когда рассматривается произвольное число групп индивидуумов $A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}, A_{n+2}, \dots, A_{2n}$, отражающих существенную неоднородность популяции. Использование таких групп позволяет достаточно детально исследовать проблему распространения ВИЧ-инфекции с помощью метода имитационного моделирования.

Литература

1. **Nosova E. A., Romanyukha A. A.** Regional index of HIV infection Risk based on factors of social disadaptation // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2009, Vol. 24. № 4. P. 325–340.
2. **Носова Е. А., Романюха А. А.** Модель распространения ВИЧ-инфекции в результате социальной дезадаптации // Управление большими системами. http://ubs.mtas.ru/forum/index.php?PAGE_NAME=read&FID=7&TID=518.
3. **Перцев Н. В., Романюха А. А., Касаткина В. С.** Нелинейная стохастическая модель распространения туберкулеза // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 1.2 (31). С. 246–250.
4. **Pertsev N. V., Leonenko V. N.** Stochastic individual-based model of spread of tuberculosis // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2009. Vol. 24. № 4. P. 341–360.
5. **Михайлов Г. А., Войтишек А. В.** Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. М.: Академия, 2006.
6. **Марченко М. А.** Комплекс программ MONC для распределенных вычислений методом Монте-Карло // Сибирский журнал вычислительной математики. 2004. Т. 7. № 1. С. 43–55.
7. **Красносельский М. А. и др.** Приближённое решение операторных уравнений. М.: Наука, 1969.
8. **Беллман Р.** Введение в теорию матриц. М.: Наука, 1976.

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ОЦЕНКИ И УПРАВЛЕНИЯ
РИСКАМИ ВИРТУАЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ
СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ****Э. Б. Песиков (Санкт-Петербург)**

В связи с развитием сетевых технологий большой интерес представляет такая организационная структура, как виртуальное предприятие, в рамках которого наиболее полно реализуются такие свойства систем, как адаптивность, гибкость и управляемость [1]. При этом весьма актуальна проблема совершенствования аналитического инструментария риск-менеджмента для виртуального предприятия.

Целью исследования является разработка моделей и методов оценки и оптимального управления рисками виртуального предприятия, основанных на применении методов риск-менеджмента, имитационного моделирования и аналитических имитационных систем.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- построение структуры виртуального предприятия, включая подбор наилучших кандидатов на роль агентов виртуального предприятия с помощью метода анализа иерархий (метод Т. Саати);
- ранжирование риск-факторов и определение степени их влияния на общий уровень риска стратегии виртуального предприятия с помощью метода анализа иерархий;
- разработка и реализация на компьютере статистической модели движения финансовых потоков виртуального предприятия, основанной на применении метода Монте-Карло и позволяющей учитывать стохастический характер параметров внешней и внутренней среды;
- построение и реализация на компьютере статистической модели управления рисками предприятия, при построении которой были реализованы известные в теории риск-менеджмента методы минимизации рисков;
- рассмотрение возможности применения оптимизационных подходов к управлению рисками предприятия.

В работе [2] на примере инвестиционного проекта по созданию виртуального издательско-полиграфического предприятия приводится построение математического описания функционирования территориально распределенной производственной системы с сетевой организацией. Виртуальное предприятие может рассматриваться как производственная структура в виде сети, включающей в себя ядро (небольшую группу перспективно мыслящих лидеров, которые изначально разработали проект по созданию виртуального предприятия, занимаются его эксплуатацией и маркетингом и являются его владельцами) и множество агентов-предприятий [1]. В качестве агентов виртуального издательского предприятия привлекаются такие компании, как:

- студия по Web-дизайну (для создания сайта виртуального предприятия);
- консалтинговая компания (для проведения маркетинговых исследований рынков печатной продукции);
- рекламное агентство (для стимулирования и формирования спроса на издания);
- компания по допечатной подготовке издания;
- типография (для печати тиража и реализации послепечатной стадии подготовки изданий);
- логистическая компания (для доведения печатной продукции до потребителей).

К наиболее важным при проектировании виртуального издательско-полиграфического предприятия относится задача оптимального подбора агентов, за-

ключающаяся в выборе по заданному набору критериев из множества возможных кандидатов на роль агента (альтернатив) наиболее предпочтительного. Для оптимизации выбора кандидата в агенты предлагается использовать метод анализа иерархий, разработанный известным специалистом по исследованию операций Т. Саати [3].

Одной из проблем в теории и практике виртуального предприятия является разработка адекватных математических моделей функционирования данного класса организационных систем. На основе изучения теории и практики менеджмента и маркетинга предприятия отрасли печати была разработана статистическая модель движения финансовых потоков виртуального издательско-полиграфического предприятия.

Риск стратегии характеризуется: событиями, оказывающими негативное воздействие на исследуемую систему, вероятностью появления этих событий и оценкой возможного ущерба в результате наступления этих событий [4]. Для решения задачи ранжирования риск-факторов и определения степени их влияния на общий уровень риска проекта по созданию виртуального предприятия также может быть использован метод анализа иерархий.

После выявления наиболее значимых риск-факторов необходимо провести количественный анализ рисков стратегий, заключающийся в численном измерении степени влияния этих риск-факторов на поведение критериев эффективности стратегии. Наиболее часто применяются такие методы количественного анализа рисков, как метод корректировки нормы дисконта, метод “дерева решений”, анализ чувствительности, анализ сценариев, метод имитационного моделирования. Наиболее точным при анализе эффективности и риска стратегий является статистическое моделирование движения денежных потоков виртуального предприятия, учитывающее вероятностный характер риск-факторов и позволяющее не только оценивать, но и управлять рисками стратегий. Реализуемый при применении метода Монте-Карло комплексный подход к оценке риска заключается в том, что для аналитика представляется возможным анализировать различные измерители риска – распределение вероятностей, оценки математического ожидания, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации. Для количественной оценки риска был использован и такой показатель, как вероятность реализации эффективного проекта.

Процесс создания виртуального предприятия можно рассматривать как инвестиционный проект, для оценки экономической эффективности которого могут быть использованы известные в теории инвестиционного проектирования показатели.

Имитационная модель движения денежных потоков предприятия, основанная на применении метода Монте-Карло, имеет вид

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 - z\delta,$$

где NPV – чистый приведенный доход (выходной показатель);

CF_t – чистый денежный поток интервала (месяца) t ;

r – ставка дисконтирования;

T – длительность реализации проекта, в интервалах t ;

I_0 – первоначальные инвестиции;

z – потери от реализации риск-фактора;

$z \in N(m_z, \sigma_z^2)$ – случайная величина, подчиненная нормальному закону распределения с заданными параметрами m_z и σ_z^2 ;

m_z – математическое ожидание случайной величины z ;

σ_z^2 – дисперсия случайной величины z ;

δ – дискретная случайная величина, моделирующая реализацию риск-фактора и принимающая значение 1 (если имеет место реализация риск-фактора) с вероятностью α и 0 (реализация риск-фактора отсутствует) с вероятностью $(1 - \alpha)$; α – заданный уровень вероятности реализации риск-фактора.

Управление рисками заключается в идентификации и анализе рисков и выработке плановых мер по минимизации негативных последствий наступления рисков событий. К известным методам управления рисками относятся такие методы, как диверсификация, уклонение от рисков, компенсация и локализация [4]. В работе [2] использовался метод страхования риска, представляющий собой возможный способ снижения риска и заключающийся, по существу, в передаче определенной доли риска страховой компании. При этом для управления риском предлагается модифицированная статистическая модель движения финансовых потоков предприятия, основанная на включении в исходную модель переменных и параметров, соответствующих реализации анти-рисковых мероприятий:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t - w_t}{(1+r)^t} - I_0 - z\delta + s\delta,$$

где w_t – регулярные страховые взносы на антирисковые мероприятия в интервале t ;
 s – размер страховой премии.

В теории риск-менеджмента показывается, что имитационное моделирование методом Монте-Карло может быть использовано также и для построения оптимизационных моделей управления рисками с целью выбора минимального уровня риска при заданной ожидаемой экономической эффективности инвестиционного проекта или максимальной экономической эффективности проекта при заданном предельно допустимом уровне риска [5].

В рамках фиксированного метода управления рисками оптимизационный подход может быть реализован двумя способами. В первом способе необходимо минимизировать вероятность риска инвестиционного проекта $P(NPV < 0)$, обеспечивая при этом ожидаемую эффективность проекта, не меньшую минимально допустимого значения показателя ожидаемой эффективности $m_{доп}$. При такой постановке оптимизационная задача будет иметь следующий вид:

найти $\min P(NPV < 0)$

при условии $M(NPV) \geq m_{доп}$,

где P – символ вероятности;

$P(NPV < 0)$ – вероятность реализации неэффективного проекта;

NPV – показатель экономической эффективности проекта (чистый приведенный доход);

$M(NPV)$ – математическое ожидание показателя NPV .

При втором способе находится максимум ожидаемой эффективности проекта $M(NPV)$ при необходимости обеспечения уровня вероятности риска проекта, не превышающего максимально возможного значения показателя рискованности проекта $p_{доп}$.

В этом случае оптимизационная задача записывается следующим образом:

найти $\max M(NPV)$

при условии $P(NPV < 0) \leq p_{\text{дон}}$.

Решениями этих задач будет набор $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*, P^*(NPV < 0), M^*(NPV))$, состоящий из оптимальных значений управляемых переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$ и оптимизируемых показателей. Для нахождения этого набора можно применить такие известные методы математического программирования, как линейное или нелинейное программирование. Для реализации оптимизационных подходов необходимо задать функциональные зависимости вероятности реализации неэффективного проекта $P(NPV < 0) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и ожидаемого значения эффективности $M(NPV) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ от управляемых переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$. Это можно осуществить путем аппроксимации зависимостей с помощью планирования эксперимента [6]. Результирующими показателями при построении регрессии будут значения показателей эффективности и степени риска, полученные в результате имитационного моделирования для каждого «опыта». Под опытом понимается расчет выходных параметров математической модели инвестиционного проекта по созданию виртуального предприятия при заданной комбинации факторов.

Дальнейшим развитием оптимизационного подхода к управлению рисками является поиск наилучшего метода управления рисками. Для управления рисками инвестиционного проекта могут быть использованы различные альтернативные методы управления рисками. Например, можно сравнивать между собой такие известные методы управления рисками, как метод уклонения от рисков (метод страхования рисков) и метод диверсификации. Тогда на первом этапе осуществляется поиск оптимального способа в рамках каждого из альтернативных методов, а затем на втором этапе проводится выбор наилучшей альтернативы. Сравнение альтернатив осуществляется с использованием математического аппарата проверки статистических гипотез о равенстве средних значений.

Обсуждаются вопросы построения аналитической системы управления рисками, выявления наиболее значимых риск-факторов и минимизации рисков стратегии виртуального предприятия с использованием имитационной системы "AnyLogic" [7].

Рассматриваются результаты проведенных вычислительных экспериментов по имитационному моделированию управления рисками стратегий издательского предприятия с помощью имитационной системы «AnyLogic». Приводятся результаты анализа на компьютере двух имитационных моделей, реализующих такие методы управления рисками, как уклонение от риска (метод страхования) и компенсация.

В рамках реализации первой модели были исследованы две стратегии предприятия (без управления риском и с управлением риском с использованием страхования). При построении модели управления рисками в исходную имитационную модель функционирования предприятия были включены параметры, определяющие выплату регулярных страховых взносов и получение страховой премии. Сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов показал предпочтительность для предприятия стратегии со страхованием риска.

При построении второй статистической модели управления рисками предприятия рассматривался такой существенный риск для виртуального предприятия, как отказ от сотрудничества одного или нескольких агентов при выполнении заказа. При этом определенная часть продукции не будет реализована и предприятие понесет убытки. Для минимизации рисков при реализации заказа предлагается рассмотреть участие в проекте альтернативных кандидатов на роль агента в случае отказа от сотрудничества основного исполнителя.

Заключение. Анализ результатов вычислительных экспериментов по реализации на компьютере предлагаемых статистических моделей управления рисками стратегий издательского предприятия подтверждает корректность рассматриваемых подходов к построению аналитического инструментария управления рисками виртуального предприятия.

Целесообразно провести исследования по применению и других известных методов управления рисками, например таких, как сценарное логико-вероятностное управление рисками [8].

Представляются перспективными постановка и реализация задач оптимального управления рисками с учетом разнонаправленности эффекта антирисковых мероприятий и издержек, связанных с реализацией антирисковых мероприятий.

Целесообразно в дальнейшем развитие оптимизационного подхода к управлению рисками, сводящееся к построению моделей и методов поиска наилучшего метода управления рисками.

Литература

1. **Вютрих Х. А., Филипп А. Ф.** Виртуализация как возможный путь развития управления // Проблемы теории и практики управления. 1999. № 5.
2. **Песиков Э. Б.** Управление риском стратегии виртуального предприятия с помощью метода анализа иерархий и статистического моделирования // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: Труды международной научной школы МАБР-2009 (Санкт-Петербург, 7–11 июля 2009 г.). СПб.: ГУАП, 2009. С. 240–246.
3. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993.
4. Риск-анализ инвестиционного проекта / Под ред. М. В. Грачевой. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001.
5. Риск-менеджмент инвестиционного проекта: Учебник для вузов / Под ред. М. В. Грачевой, А. Б. Секерина. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2009.
6. **Налимов В. В., Чернова Н. А.** Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965.
7. **Карпов Ю. Г.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ–Петербург, 2005.
8. **Соложенцев Е.Д.** И³-технологии для экономики. СПб.: Наука, 2011.

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В КРИЗИСНЫХ И
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ****Д. А. Разумов, В. Д. Алёшин (Москва)**

Рассматриваемая в докладе автоматизированная система управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях (АСУ КЧС) – большая система, относящаяся к классу пожизненных систем. Имеется в виду, что пожизненная система востребована всегда, но время эксплуатации конкретного варианта ограничено. По прошествии определенного времени требования к системе и её функциональным возможностям подлежат пересмотру и корректировке.

Достаточно часто предпринимаются попытки построения АСУ КЧС собственными силами. Практика же создания больших систем показывает, что наиболее рационально создание автоматизированной системы (АС) на основе стандартного решения. Опыт работы с большими системами пока (тем более в регионах) незначителен. Условия и специфика развертывания АСУ КЧС в каждом регионе свои. Это обстоятельство требует формализации инструментов, которые будут использоваться при создании системы на основе стандартного решения. Важно, чтобы заказчик понимал потребность и специфику использования соответствующих инструментов.

Сложившиеся подходы к построению АСУ КЧС основаны преимущественно на функциональном подходе и механистической модели управления. При построении же больших систем необходимо использовать идеи стандарта ГОСТ Р ИСО-МЭК 15288–2005 "Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем", который "... распространяется на системы, которые созданы человеком и состоят из одного или нескольких следующих элементов: технические средства, программные средства, люди, процессы, процедуры ..." [1]. Центральная идея стандарта – междисциплинарный подход к проблеме успешного создания систем и средство для её решения. В качестве ключевых аспектов системной инженерии в стандарте определены: системный подход, жизненный цикл системы, инжиниринг требований, архитектурный дизайн, процессный подход, проектный подход.

Системный подход к построению больших систем (тем более с участием людей) диктует использование такого инструмента, как моделирование, в том числе имитационное моделирование (ИМ). По мере развёртывания и настройки системы потребность в ИМ только возрастает, и это должно быть понятно заказчику. Этого можно добиться через описание потребности в ИМ по стадиям развития системы. Фактически идет речь о формализации жизненного цикла (ЖЦ) системы, построение модели ЖЦ системы как со стороны заказчика, так и со стороны поставщика стандартного решения, необходима "привязка" задач, которые эффективно решаются на основе ИМ, к модели ЖЦ системы.

Жизненный цикл системы

Рассмотрение проблемы формализации ЖЦ АСУ КЧС начнем с общих определений, которыми будем далее руководствоваться. Совокупность процессов и этапов развития организмов живой природы, технических систем, продуктов производства от моментов зарождения или появления потребности их создания и использования до прекращения функционирования или применения принято называть жизненным циклом (ЖЦ) [2, 3].

Жизненный цикл автоматизированной системы (АС) – совокупность взаимосвязанных процессов создания и последовательного изменения состояния АС, от форми-

рования исходных требований к ней до окончания эксплуатации и утилизации комплекса средств автоматизации АС [4].

Программные средства (ПС) АСУ КЧС – ключевой компонент системы. В этой связи важно отметить, что ЖЦ ПС имеет существенные отличия от ЖЦ аппаратуры, так как ПС подвержены изменениям в течении всего их ЖЦ. В этой связи важно выделять как ЖЦ системы, так и ЖЦ ПС, более того, важно говорить о стадиях жизни как системы, так и ПС.

Понятие стадий жизни программного обеспечения введено в [5], где были определены следующие три стадии: разработка, использование, сопровождение (продолжающаяся разработка). В ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288:2005 *стадия определяется как "период в пределах жизненного цикла системы, относящийся к состоянию системного описания или непосредственно к самой системе"* [1], а модель ЖЦ включает одну или несколько стадий и "... собирается в виде последовательности стадий" [1].

В случае ПС, входящего в состав АСУ КЧС, важно не просто выделять стадии жизни, но синхронизировать стадии использования ЖЦ ПС и стадии его сопровождения (продолжающейся разработки). Таким образом, в этих стадиях ЖЦ принимают участие разные организации: приобретающая сторона¹ и поставщик. В таблице приведены стадии ЖЦ КЧС. Более подробно вопросы построения моделей ЖЦ КЧС приведены в [6].

Потребность в имитационном моделировании по стадиям ЖЦ КЧС

Во многих случаях имитационное моделирование – единственный способ получить представление о поведении сложной системы и провести ее анализ. Не составляет исключения и АСУ КЧС на различных стадиях ЖЦ как со стороны правообладателя, так и со стороны поставщика (см. таблицу).

В соответствие с предложенной классификацией стадий ЖЦ правообладателя могут применяться следующие ИМ. На стадиях замысла и технорабочего проекта (при решении проблем применения сложных ИТ инфраструктур, анализа производительности серверов, узких мест локальной сети и т.п.) может быть применен метод дискретно-событийного моделирования. Этот подход также хорошо применим при проектировании технической инфраструктуры телекоммуникационных компаний, и позволяет достаточно точно обосновывать необходимость тех или иных технических и финансовых ресурсов при организации каналов связи с заданной пропускной способностью при имеющихся ограничениях. Стадии стратегического планирования и управления, а также анализа, в какой из моментов следует переключать производство в режим модернизации, консервации, прекращения применения могут быть поддержаны ИМ на базе агентского моделирования. Вопросы оптимального управления городским хозяйством также могут моделироваться на стадиях замысла, проектирования, эксплуатации и анализа принятия решений. Подобные разработки эффективно используются при оснащении ситуационно-аналитических центров мэрий и городских администраций во многих странах.

Для стадий ЖЦ поставщика могут быть применимы принципы агентского моделирования (при описании моделей поведения потребителей на рынке и специфики покупателя (заказчика)). В этом контексте имеет смысл также рассматривать ЖЦ товаров и услуг. Моделирование конкуренции компаний на рынке с помощью агентской и дискретно-событийной парадигмы может применяться практически на всех стадиях ЖЦ поставщика.

¹ Правообладатель, который приобретает или получает продукт или услугу от поставщика [1].

Таблица 1

Стадии ЖЦ АСУ КЧС

Со стороны правообладателя	Со стороны поставщика
Стадия замысла	Стадия продажи
Стадия закупки	
Стадия технорабочего проекта	Стадия технорабочего проекта
Стадия ввода в действие	Стадия развертывания
Стадия опытной эксплуатации	
Стадия применения (эксплуатации)	Стадия продолжающейся разработки (сопровождения)
Стадия поддержки применения	
Стадия анализа и принятия решения	
Стадия прекращения применения и списания	

Пример использования имитационной модели на стадии технорабочего проекта

Ситуация с центром обработки вызовов 112 (ЦОВ 112) в России различается от региона к региону. Как правило, иерархия подразделений формируется на уровне области из вновь создаваемых ЦОВ 112, на уровне муниципальных районов – из единых дежурных диспетчерских служб (ЕДДС) и существующих ЦОВ 01, 02, 03, 04, 05 дежурных диспетчерских служб. Во многих регионах ЕДДС существуют лишь на бумаге и не имеют технических средств. Часто из-за отсутствия технических возможностей информация о ЧС может передаваться не в ЦОВ 112, а в службу 01.

Для реализации проекта на стадии технорабочего проекта в конкретных технических, ресурсных и финансовых ограничениях использование ИМ – настоятельная необходимость. На этой стадии ЖЦ системы модель системы в целом следует рассматривать как конфигурацию из набора типовых настраиваемых компонентов, связанных информационными каналами. Модели нужно комбинировать из типовых моделей системы массового обслуживания. Параметры же моделей – центральная проблема моделирования в наших условиях (как следует из вышесказанного), осложняемая отсутствием доступной статистики по ЦОВ 112 в целом. Не лучше обстоит дело со статистиками служб. Наиболее доступной является статистика службы 02. В зависимости от варианта построения системы управления КЧС в том или ином регионе необходимо задавать на входе в ЦОВ 112 временные ряды в соответствии с идентифицированными параметрами закона распределения либо формировать их как композицию временных рядов отдельных диспетчерских служб. Для начальной оценки технических, ресурсных и финансовых ограничений далее предлагается методика построения модели массового обслуживания, параметры которой идентифицированы на основе временных рядов службы 02.

Предлагаемая методика использует временные ряды службы 02 и предполагает:

- оценку законов и параметров распределения поступления обращений и обработки обращений в службу 02;
- построение имитационной модели и её тестирование на реальных временных рядах;
- оценку законов и параметров распределения поступления обращений и обработки обращений в диспетчерские службы структур, участвующих в ликвидации последствий кризисных или чрезвычайных ситуаций;
- построение имитационной модели службы ЦОВ 112 на основе моделей служб;

• оценка (на основе критериев согласия) статистических характеристик композиционного потока данных модели ЦОВ 112.

Исследования проводились на отрезке временного ряда обращений в дежурную диспетчерскую службу (ДДС) за 2003 г. ЦОВ ГУВД 02 г. Кемерово. Первичная верификация имитационной модели проводилась на отрезке временного ряда данных с 01.01.2007 г. по 01.07.2007 г.

Разбиение исходного входного потока заявок на подпотоки

Из имеющихся исходных данных выделим события, характеризующиеся следующими типами: СООБЩЕНИЕ03, БОЛЬНИЦА, ТРАВМПУНКТ, СКОРАЯ, АМПУТАЦИЯ, КОЛОТО-РЕЗАНИЕ, ОГНЕСТРЕЛЬНЫЕ, ПОПЫТКА САМОУБИЙСТВА, РУБЛЕННЫЕ РАНЫ, СЛЕДЫ ОТ ПОБОЕВ, ЧЕРЕПНО-МОЗГОВАЯ, ОЖОГИ, ОТРАВЛЕНИЕ, ПОТЕРПЕВШИЙ ОТ ДТП, СКОРОПОСТИЖНАЯ СМЕРТЬ, ТРАВМЫ, УШИБЫ, ТРУП, ДТП С ПОСТРАДАВШИМИ, ДТП СО СМЕРТЕЛЬНЫМ, НОЖЕВОЕ РАНЕНИЕ, ПОБОИ ИСТЯЗАНИЯ.

Отчётливо видно что, в имеющемся статистическом материале ЦОВ ГУВД 02 г. Кемерово присутствует не менее 20% заявок, которые явно или косвенно влекут за собой вызов на место происшествия бригад скорой медицинской помощи. Следовательно, для того, чтобы иметь возможность сделать выводы о дополнительном привлечении той или иной экстренной службы, необходимо разделить имеющийся входной поток по следующим типам:

- 01 – требуется реагирование только сил и средств ДДС противопожарной службы;
- 02 – ДДС МВД;
- 03 – ДДС скорой медицинской помощи;
- 0103 – ДДС 01 и 03 соответственно;
- 0102 – ДДС 01 и 02;
- 0203 – ДДС 02, 03;
- 010203 – ДДС 01,02,03.

Покажем на примере наиболее характерных событий, поступающих в службу 02 УВД г. Кемерово, как можно разделить имеющийся входной поток на события в соответствии с предложенной классификацией. Из исходного потока можно выделить подпоток, который обслуживается исключительно ресурсами ДДС 02 (тип 02). На основе имеющейся статистики известными методами получаем законы распределения для различных подпотоков.

Идентификация закона распределения интервалов поступления заявок для подпотока 02 (рис. 1) показывает, что представленный график соответствует экспоненциальному закону с параметром интенсивности 10. Аналогичным способом получаем параметры подпотоков 0202, 0102, 010203.

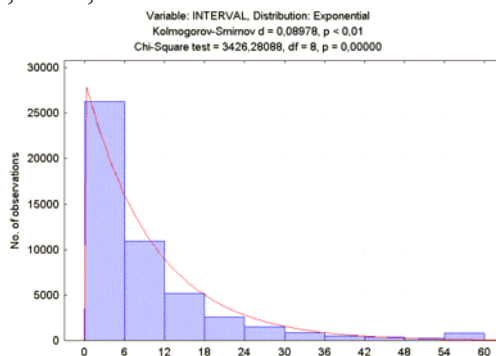


Рис. 1. График плотности распределения интервалов поступления заявок подпотока 02

Описание модели

На данном этапе основная цель моделирования заключается в проверке гипотезы о том, что модель центра обработки экстренных вызовов с расщеплением входного потока заявок по классам будет адекватной в смысле формирования итогового потока модели без расщепления. В отличие от предыдущего исследования поток заявок должен состоять из нескольких подпотоков, каждый из которых обладает свойством экспоненциальности, но отличается от другого класса интенсивностью.

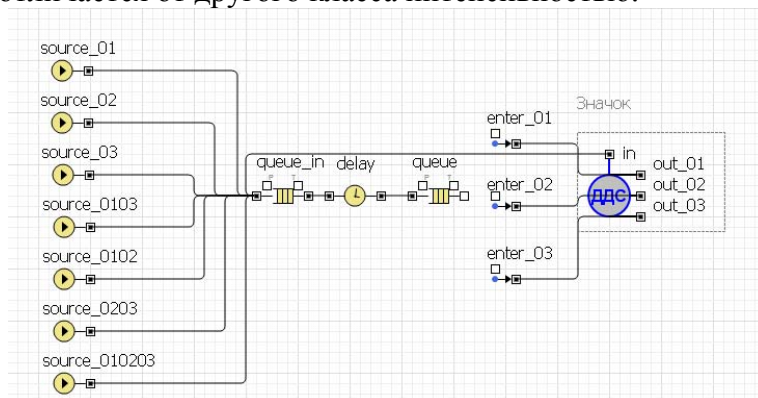


Рис. 2. Модель ДДС с расщеплённым входным потоком и с выходом, порождающим заявки к специализированным спецуслам 01, 02, 03

Каждый из источников генерирует заявки одного из описанных классов в соответствии с экспоненциальным законом распределения и выбранным параметром интенсивности. Далее заявки поступают на вход очереди (queue_in). При этом для исследуемого случая заявки будут инициироваться источниками source_02, source_0203, source_0102, source_010203. Так как заявки только этих классов были обнаружены в исходных данных (рис. 2).

Описание эксперимента

На основе исходных данных, полученных, как описано выше, проведена серия экспериментов на представленной имитационной модели. На рис. 3 представлены результаты моделирования функционирования ДДС с входным потоком, генерируемым несколькими источниками. В данном случае сложный объект (complexSource_1), описывающий ЦОВ с несколькими источниками (см. рис. 2) представляется на уровне презентации обобщённо в виде значка «ДДС». Класс этого объекта формируется наследованием от класса ComplexSource, представленного средствами графического моделирования на рис. 2. Каждый из источников формирует подпоток определённого типа с интенсивностью экспоненциального закона распределения, которые были выделены и идентифицированы выше. Совокупность заявок всех представленных типов в точности составляет исходный статистический поток УВД 02 г. Кемерово.

На основе предложенного подхода имеется возможность на последующих этапах работы разработать параметризованную модель управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях для муниципального формирования (округа) или региона. Эта модель будет включать в себя совокупность действующих на определённой территории ДДС 01, 02, 03, ..., ЕДДС/112, соединённых информационными связями по потокам заявок и действующих в рамках следующих ограничений:

- нахождение заявки в очереди на обслуживание не более определённого времени;
- наличие в распоряжении каждой из ДДС определённого количества ресурсов реагирования (экипажей ППС, бригад скорой медицинской помощи, нарядов государственной противопожарной службы и т.д.).

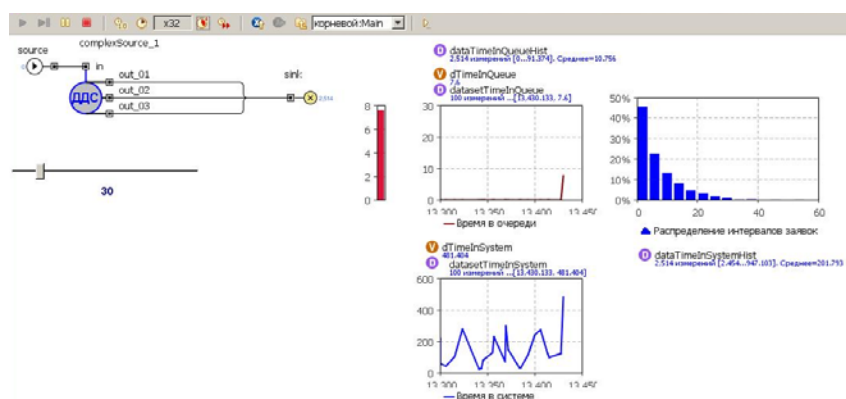


Рис. 3. Функционирование ДДС с входным потоком, генерируемым несколькими источниками

Манипулируя последним ограничением, мы можем добиваться выполнения первого, которое является основным показателем правильности функционирования системы.

На данном этапе работ можно сформулировать следующие выводы.

1. На основе имитационной модели показано, что расщепление потока заявок на классы с соответствующими параметрами распределения не приводит к изменению параметров распределения исходного (совокупного) потока.
2. Используя свойство, описанное в п. 1, мы можем построить универсальную типовую имитационную модель ДДС, которая будет адекватно представлять работу ДДС любого типа (01,02,03 и т.д.)

На основе универсальной типовой имитационной модели ДДС и связей между объектами, ею описанных, возможно построить в целом имитационную модель системы управления в КЧС, которая позволит определять финансовые и ресурсные параметры построения системы на базе предложенных нормативов. В качестве базового норматива выбирается нахождение заявки в очереди, что на практике определяет время прибытия служб экстренного реагирования на место происшествия.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288:2005 Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем (ISO/IEC 15288:2002 «System engineering – System life cycle processes»).
2. Толковый словарь по вычислительным системам. М.: Машиностроение, 1990.
3. **Липаев В. В.** Программная инженерия. Методологические основы. Курс лекций/ М.: Теис, 2006.
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-99 Информационная технология. Процессы жизненного цикла программных средств.
5. **Фокс Дж.** Программное обеспечение и его разработка. М.: Мир, 1985.
6. **Алёшин В., Разумов Д.** Модели стратегического и оперативного управления жизненным циклом автоматизированной системы управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях (в печати).

ТЕХНИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПРИОРИТЕТНЫХ СИСТЕМ*

Ю. И. Рыжиков (Санкт-Петербург)

Введение

Системы обслуживания любого рода (технические и организационные) и назначения (производственные процессы, передача данных, здравоохранение, бытовое обслуживание, охрана общественного порядка, военное дело) время от времени нуждаются в профилактическом осмотре, проведении регламентных и ремонтных работ и, наконец, в отдыхе персонала. Необходимость непрерывного выполнения ответственных функций, хотя бы и с уменьшенной производительностью, определяет применение *многоканальных* систем обслуживания. Такие системы, особенно в период функционирования в неполном составе, эксплуатируются в режиме, близком к насыщению. Поэтому для достижения приемлемой оперативности обслуживания хотя бы по наиболее важным заявкам приходится вводить *приоритеты*. Теория многоканальных систем обслуживания с приоритетами до настоящего времени практически не разработана. В обсуждающих ее немногих статьях делаются настолько стеснительные оговорки (как правило, об экспоненциальном и к тому же одинаковом для всех типов заявок распределении времени обслуживания [1]), что результаты оказываются бесполезными.

В работе автора [2] намечена свободная от этого ограничения схема решения задачи для средних значений ожидания (пребывания) в системе заявок каждого вида и демонстрируются удовлетворительные результаты ее применения. Однако некоторые элементы этой схемы построены на эвристиках, не гарантирующих достаточную точность во всем возможном диапазоне данных.

Изложенные соображения вынуждают считать имитационное моделирование (ИМ) единственным (пока) реальным инструментом исследования многоканальных систем с приоритетным обслуживанием. Среди инженеров и экономистов большой популярностью пользуются системы автоматизации ИМ (САИМ), прежде всего, созданная полвека назад GPSS и ее многочисленные клоны. Любая такая система избавляет потребителя от описания сложной логики процесса, предлагая ему транслятор, модифицирующий и настраивающий встроенный «универсальный» алгоритм моделирования. *Эта универсальность не может не быть ограниченной*, поскольку для любой системы ИМ существуют недоступные ей ситуации (например, для GPSS – моделирование вложенных прерываний и многоканальных систем с прерываниями). С другой стороны, претензии на универсальность усложняют фактически реализуемую модель. К примеру, в проведенном автором эксперименте по моделированию многоканальной системы обслуживания прогон GPSS-программы занял 4 с, а составленной на Фортране – 0.05 с. Разумеется, здесь важны не абсолютные значения трудоемкости, а разница в скорости – 80 раз!

По указанным причинам никакая САИМ, особенно при решении исследовательских задач, не заменит «прямого» моделирования на языках решения общематематических задач типа современного Фортрана, где возможности построения сложных моделей ограничены только *компетентностью программиста*. Заметим, кстати, что именно здесь проходит магистральный путь совершенствования САИМ. Ниже дается описание логики моделирования многоканальных приоритетных систем применительно к обоснованию будущих полуаналитических методов расчета. Соответственно целью мо-

*Работа поддержана программой фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект 2.3) и грантом РФФИ 10-08-00906-а.

делирования являлось определение по каждому типу заявок средних значений времени пребывания, кратности прерываний и их длительности.

Логика моделирования

При описании логики заявленной модели мы ограничимся указанием ее особенностей, имея в виду, что общая схема модели многоканальной системы читателю известна (см., например, [3]). Настройка модели на типы распределений интервалов между заявками и длительности обслуживания производилась посредством допускаемых современным Фортраном *внутренних процедур*. Генерировался суммарный рекуррентный поток внешних заявок с последующим случайным выбором вида заявки на основе их долей в суммарном потоке. Интенсивность потока для поддержания расчетного коэффициента загрузки умножалась на заданное число каналов. Распределение времени обслуживания для всех видов предполагалось однотипным с различными по видам заявок средними, причем соответствующий генератор предполагался сменным (рассматривались регулярное, показательное, эрлангово и гиперэкспоненциальное распределения).

Вышеуказанная цель моделирования определяет необходимость сбора соответствующей статистики раздельно для заявок каждого вида. В нашем случае на каждую заявку заводится паспорт, включающий в себя тип заявки z (он же – индекс приоритета), момент τ ее входа в систему, случайную трудоемкость θ . Для *прерванной* заявки в качестве θ записывается *остаток* времени обслуживания, вычисляемый как разность моментов планового завершения обслуживания и начала последнего прерывания его. В остальные позиции паспорта записываются кратность прерываний, начало последнего прерывания данной заявки и суммарная длительность ожидания.

При однородных каналах простейшей дисциплиной выбора занимаемого канала является «первый свободный», выявляемый по наименьшему превышающему допустимые значения таймера «запредельному» моменту освобождения. Содержание паспортов заносится в каналы (при наличии свободных) или в очереди – раздельно по типам заявок в порядке возрастания моментов прибытия. В «канальном» массиве 5-я позиция паспорта отводится для запоминания «физического» номера канала, обслуживающего данную заявку. Для ускорения поиска прерываемых и выбираемых на обслуживание после освобождения канала заявок после изменения состояния любого канала проводится перепорядочение списка «канальных» паспортов по убыванию приоритетов, а при равных приоритетах – по возрастанию времени прибытия в систему. В этом случае кандидат на прерывание всегда оказывается последним. Таким образом, в случае прибытия заявки в полностью занятую систему приоритет вновь прибывшей заявки достаточно сопоставить с приоритетом обслуживаемой в последнем канале.

Обозначим через π младший приоритет текущего обслуживания и сравним его с типом i новой заявки. При $i < \pi$ заявка, находящаяся в n -й позиции списка, прерывается; определяется остаток обслуживания; прерванная заявка помещается в очередь. При $i \geq \pi$ в i -очередь помещается новая заявка. Место вставки для прерванной заявки нужно искать в начале частной очереди, а для новой – в ее конце. Если общая очередь уже имеет максимальную длину, то (в зависимости от соотношения приоритетов) получает отказ либо новая заявка, либо последняя заявка в очереди. В паспорт прерывающей заявки заносится номер освобожденного канала, после чего для нее определяется позиция вставки. Затем выполняются вставки, вследствие чего сдвигаются нижележащие паспорта. Заявка, выбираемая из очереди после завершения обслуживания, всегда помещается в n -ю строку списка паспортов.

При выборе заявки на обслуживание *из очереди* проверяется текущая кратность ее прерываний. Если эта кратность нулевая, то в 6-ю позицию паспорта заносится время ожидания (разность между таймером и 2-й позицией – моментом прибытия заявки).

В противном случае фиксируется длительность завершаемого прерывания (разность между таймером и 5-й позицией паспорта), которая добавляется к 6-й позиции. Для заявки, закончившей свое пребывание в системе, в соответствии с ее типом (первая позиция паспорта) производится накопление результирующей статистики: случаев завершения, кратностей прерываний, суммарного ожидания и длительности прерываний.

Дальнейшие обобщения

Технология формирования потока заявок с просеиванием суммарного потока может быть заменена на работу с *неоднородным рекуррентным потоком*: отдельную (с разными видами распределений) генерацию интервалов между заявками каждого вида.

При нескольких свободных каналах может потребоваться *равновероятный* выбор из них. Если таких каналов m , то для определения выбираемого канала следует вычислить $N = [m \cdot U] + 1$, где U – случайное число, равномерно распределенное на полуинтервале $[0,1)$, а квадратные скобки означают взятие целой части. Далее начинается просмотр моментов освобождения каналов, и для каждого свободного – в счетчик добавляется единица. Заявка принимается в тот канал, для которого содержимое счетчика сравняется с N . Дальнейшим обобщением может явиться полная или частичная специализация каналов обслуживания по видам обслуживаемых заявок.

Выше была описана работа модели с *дообслуживанием прерванной заявки*. Отметим дополнительные особенности моделирования приоритетной системы с прерыванием и возобновлением обслуживания со старой или новой реализациями его случайной длительности (схемы RW и RS соответственно, даже в одноканальном случае приводящие к чрезвычайно сложным расчетным схемам [4]). В первом варианте требуемое время обслуживания формируется один раз (при прибытии заявки) и в случае прерывания пересчету не подлежит. Во втором варианте целесообразно формировать требуемое время обслуживания в момент занятия канала (независимо от кратности захода) и соответствующую компоненту из паспорта заявки исключить.

Логика модели с относительным приоритетом (без прерываний) существенно проще и легко реализуется как упрощенный вариант описанной выше.

Опыт применения

Описанная модель была применена для проверки многообещающей методики «инвариантов отношения» [1]. Применительно к интересующей нас задаче «инвариант отношения» имеет вид символической пропорции, составленной из средних для соответствующих систем величин:

$$\frac{\bar{M} / \bar{G} / n}{\bar{M} / \bar{G} / 1} \approx \frac{M / G / n}{M / G / 1},$$

откуда следует, что

$$\bar{M} / \bar{G} / n \approx \bar{M} / \bar{G} / 1 \cdot \frac{M / G / n}{M / G / 1}.$$

Поскольку *численные* методы расчета систем из правой части пропорции к настоящему времени (в отличие от года написания [1]) известны [3], возникла идея использовать это отношение для расчета средних времен ожидания и пребывания заявок каждого типа *порознь*. При проведении численных экспериментов базовые интенсивности входящих простейших потоков принимались равными $\{0,222, 0,333, 0,44\}$, а средние длительности обслуживания – $\{0,45, 0,90, 1,35\}$. Для получения заданного суммарного коэффициента загрузки 0,9 интенсивности потоков умножались на этот коэффициент и на количество каналов обслуживания. Длительности обслуживания предпола-

гались подчиненными гамма-распределению с параметрами формы $\alpha=3$ и $\alpha=0,25$, что соответствовало коэффициентам вариации 0,577 и 2,0. Высшие моменты $\{b_i\}$ распределений обслуживания вычислялись через первые согласно

$$b_i = b_{i-1} \cdot b_1 \cdot [1 + (i-1) / \alpha], \quad i = 2, 3.$$

В процессе расчета по этим моментам подбиралась H_2 -аппроксимация (для первого α ее параметры оказывались комплексными, а для второго – вещественными). В табл. 1 и 2 приведены результаты расчета среднего времени пребывания заявок типов 1-3 в системе $\bar{M} / \bar{G} / n$ при относительном и абсолютном приоритетах в сопоставлении с результатами имитационных экспериментов. Прогон моделей осуществлялся до обработки 300 тыс. заявок первого типа.

Таблица 1

Относительный приоритет

Тип обслуж.	Метод	n=1			n=3			n=5		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
E_3	Имит.	1,195	2,057	11,992	0,716	1,326	4,520	0,607	1,159	3,082
	Инвар.	1,192	2,059	11,931	0,680	1,260	4,634	0,579	1,102	3,195
H_2	Имит.	3,203	5,180	37,517	1,093	2,099	12,540	0,757	1,518	7,672
	Инвар.	3,233	5,246	41,028	1,276	2,189	13,121	0,888	1,584	7,599

Таблица 2

Абсолютный приоритет

Тип обслуж.	Метод	n=1			n=3			n=5		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
E_3	Имит.	0,480	1,313	12,743	0,450	0,948	4,865	0,450	0,911	3,296
	Инвар.	0,480	1,313	12,689	0,450	0,826	4,846	0,450	0,799	3,407
H_2	Имит.	0,560	2,186	35,197	0,449	1,022	11,652	0,450	0,924	7,163
	Инвар.	0,561	2,204	41,786	0,451	0,894	13,332	0,450	0,811	7,791

Из этих таблиц можно сделать следующие выводы:

1. Расхождение результатов «инвариантного» счета и имитационного моделирования не превышает 15%, что свидетельствует о приемлемости идеи расчета и корректности как расчетных схем обоих сравниваемых подходов, так и реализующих их компьютерных программ.

2. Упомянутая корректность дополнительно подтверждается: качественным соответствием результатов разумным ожиданиям: уменьшением по числу каналов среднего времени пребывания и разброса его по типам заявок, а также заметным увеличением этого разброса при переходе от относительных к абсолютным приоритетам.

3. Расхождение результатов допустимо в очень широком диапазоне коэффициентов вариации распределений длительности обслуживания (в рассмотренных примерах – от 0,577 до 2,0) и не обнаруживает тенденцию к росту при увеличении числа каналов.

Заключение

Разработанный метод опирается на максимальную приближенность опорных вариантов к обсчитываемой ситуации и дифференцированный учет влияния вида приоритетов. Так, для относительного приоритета по методу инвариантов вычислялось среднее время ожидания, к которому затем прибавлялось известное достоверно среднее время обслуживания. Поэтому результаты счета для относительного приоритета согласуются с имитационным моделированием заметно лучше, чем для абсолютного. Таким образом, *инварианты отношения следует применять для оценки только той части результирующей величины, которая не может быть вычислена точно*. При практическом использовании инвариантного подхода необходимости в трудоемком как на этапе программирования, так и в процессе счета имитационном моделировании нет.

Основная доля трудоемкости метода приходится на расчет модели $M/H_2/n$, повторяемый для абсолютного приоритета по числу типов заявок, а для относительного приоритета – однократно.

Предложенная в данной статье схема использования инвариантов отношения, в отличие от предложений в работе [1], опирается не на приближенные оценки средней длины очереди, а на надежные численные алгоритмы. Она позволяет с достаточной для практических целей точностью рассчитывать средние времена пребывания заявок в *многоканальной системе с произвольными распределениями длительности обслуживания*.

Литература

1. **Бронштейн О. И., Духовный И. М.** Модели приоритетного обслуживания в информационно-вычислительных системах. М.: Наука, 1976. 220 с.
2. **Рыжиков Ю. И.** Средние времена ожидания и пребывания в многоканальных приоритетных системах // Информационно-управляющие системы. 2006. № 6(25). С. 43–49.
3. **Рыжиков Ю. И.** Компьютерное моделирование систем с очередями: Курс лекций. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. 164 с.
4. **Конвей Р. В., Максвелл В. Л., Миллер Л. В.** Теория расписаний / Пер. с англ. М.: Наука, 1975. 359 с.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ АГЕНТНОЙ МОДЕЛИ
МИГРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ****А. Л. Савина (Орел)**

В современном мире существует множество рынков труда, различных как по географическому положению, так и по экономическим показателям, что приводит к миграции рабочей силы из менее благоприятных для трудоустройства регионов в более благоприятные. Эта тенденция ярко проявляется в США и Европе, являющихся центрами притяжения рабочей силы из развивающихся стран Центральной и Южной Америки, Азии, Африки.

Отечественные исследователи изучают проблему миграции в двух основных аспектах [1]: отъезд из страны наиболее квалифицированных молодых специалистов, так называемая «утечка мозгов», и приезд в страну низкоквалифицированной рабочей силы из Узбекистана, Таджикистана и других стран СНГ. Сравнительно малое внимание уделяется процессам внутренней трудовой миграции. Менее значительные по мировым масштабам, они, тем не менее, затрагивают почти каждую семью в нашей стране, поддерживая замкнутый круг: низкие темпы развития региона => отток рабочей силы => еще большее снижение темпов развития региона. Сохранение данной тенденции приводит к упадку небольших городов и целых областей и гиперцентрализации мегаполисов, в первую очередь Москвы.

При исследовании миграционных явлений не следует ограничиваться оценкой общих социально экономических показателей города (региона, страны). Такие оценки достаточны для построения регрессионных моделей и получения прогнозов в относительно стабильных условиях, однако при отклонении хотя бы одного из факторов от установленных предельных значений модель утрачивает надежность. [3, с. 11–19] Это общее свойство для всех статистических моделей.

На сегодняшний день более актуально прогнозирование социально-значимых явлений, основанное на использовании имитационных моделей, реализованных в специальных программных комплексах. Для решения данной задачи наиболее предпочтителен агентный подход, поскольку он позволяет получить картину изменения социальной ситуации, основанную на последствиях решений и вытекающих из этого действий отдельных людей. Принятие социально значимого решения, такого как решение о переезде в другой город, происходит на основании сложной системы оценок различных параметров уровня жизни, с одной стороны, в том месте, где человек проживает в настоящий момент, с другой, – там, куда он может переехать.

Принципы получения нечетких оценок уровня жизни

Основными факторами, влияющие на оценку уровня жизни, а следовательно, на принятие решения о миграции, являются уровень заработной платы, жилищные условия, состав домохозяйства, возможность получения образования и др. Ни один из этих факторов не поддается простой количественной оценке. Рассмотрим, какие соображения могут повлиять на агента при поиске работы, в частности, при оценке предлагаемой заработной платы.

Во-первых, он будет сравнивать предлагаемую заработную плату с заработной платой, которую получают его знакомые с аналогичным уровнем образования и квалификацией. Во-вторых, агент примет расчет уровня жизни в своем домашнем хозяйстве: чем он выше, тем на более высокую заработную плату будет рассчитывать агент. В-третьих, агент должен учитывать конъюнктуру на рынке труда и знакомства, на которые он может рассчитывать при поиске работы. Если агенту не удастся найти в не-

большом городе работу, удовлетворяющую всем этим условиям, то высока вероятность того, что он задумается о смене места жительства. Для формализации параметров уровня жизни был выбран аппарат нечеткой логики, позволяющий получать нормированные оценки на основе неточной информации [3].

Представим оценку агентом предлагаемой ему заработной платы в виде нечеткой переменной УЗ, зависящей от уровня доходов в домохозяйстве агента и его «возможностей», складывающихся из природных способностей, уровня образования и квалификации. Общий вид функции принадлежности $\mu_{УЗ}$ нечеткой переменной УЗ представлен на рис. 1.

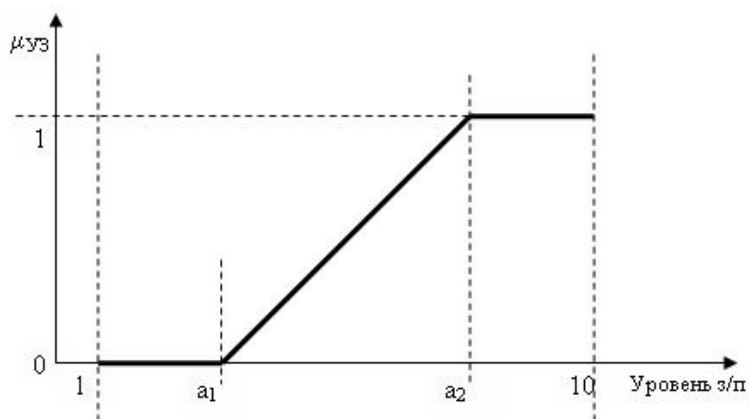


Рис. 1. Общий вид функции принадлежности $\mu_{УЗ}$

Значения нечеткой переменной УЗ нормируются в пределах от 0 до 1, причем в области значений выделяются три сегмента:

- 1.. a_1 – неприемлемый уровень зарплаты ($\mu_{УЗ} = 0$);
- a_1 .. a_2 – условно-приемлемый уровень ($\mu_{УЗ} \in (0; 1)$);
- a_2 .. 10 – приемлемый уровень ($\mu_{УЗ} = 1$).

К первому сегменту относится заработная плата, размер которой значительно меньше среднего дохода в домохозяйстве агента; ко второму – зарплата, сопоставимая со средним доходом или выше; к третьему – значительно превосходящая его. Граница первого сегмента a_1 определяется средним доходом в домохозяйстве агента. Граница второго сегмента a_2 также регулируется уровнем возможностей агента: чем он выше, тем на больший рост доходов по мере повышения квалификации он может рассчитывать.

Функция принадлежности нечеткой переменной УЗ имеет вид:

$$\mu_{УЗ}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq d - \varepsilon; \\ \frac{x - d + \varepsilon}{v}, & d - \varepsilon < x < d - \varepsilon + v; \\ 1, & x \geq d - \varepsilon + v, \end{cases} \quad (1)$$

где x – уровень заработной платы агента;

$\mu_{УЗ}$ – функция принадлежности нечеткой переменной УЗ,

d – уровень дохода в домохозяйстве агента;

v – уровень возможностей агента;

ε – некоторое натуральное число ($\varepsilon=1$ показывает, что агент допускает возможность работы с уровнем зарплаты не более, чем на 1 пункт ниже среднего дохода в его домохозяйстве).

Однако, если не составляет труда сформировать такие оценки для города, в котором проживает агент, то для других городов оценка уровня жизни является более сложной задачей, поскольку сам агент не находится там, не ищет работу и жилье. Информация об уровне жизни в другом городе поступает к агенту из разных источников, которые делятся на две группы:

- рассеянные, т. е. воздействующие одинаково на всех агентов (средства массовой информации, Интернет, официальные статистические сборники, современная художественная литература и кинематограф);
- направленные, т. е. действующие лишь на определенного агента или группу агентов (рассказы знакомых, поездки).

По мере поступления, анализа и систематизации этой информации агент строит свою субъективную картину жизни в другом городе. Следует принять во внимание, что агента в большей степени интересует не всеобъемлющая картина города, а те ее части, которые могут иметь к нему непосредственное отношение в случае, если он решится на переезд.

Оценка ожидаемого уровня заработной платы (ОУЗ) формируются аналогичным образом, с той разницей, что информация, лежащая в ее основе, менее надежна. Интегральные оценки уровня жизни (УЖ) и ожидаемого уровня жизни (ОУЖ) учитывают также уровень имеющихся и ожидаемых жилищных условий агента. Оценки УЖ и ОУЖ можно сравнивать, так как обе они нормируются в пределах от 0 до 1.

Помимо экономических и социальных, необходимо учитывать также психологические причины, в основе которых лежит склонность человека к переменам, или, наоборот, природная инертность. Согласно социологическим исследованиям, к энергичным и деятельным людям можно отнести от пяти до семи процентов населения, остальные же в большей степени склонны подстраиваться под обстоятельства, в которых оказались, чем пытаться их изменить.

Тем не менее по мере роста недовольства условиями жизни, у агента накапливается энергия, способная по достижении некоторого порога толкнуть его на решительные действия. Уровень недовольства агента зависит от следующих показателей:

- размаха между имеющимся и ожидаемым уровнем жизни (чем он больше, тем выше недовольство агента);
- времени, в течение которого агент находится в неудовлетворительном состоянии.

Уровень недовольства E_1 рассчитывается по формуле

$$E_1(x, t) = \mu_{\text{оуж}}(x, t) - \mu_{\text{уж}}(x, t), \quad (2)$$

где $\mu_{\text{уж}}(x, t)$ – значение функции принадлежности уровня жизни агента x в своем городе в такт времени t ;

$\mu_{\text{оуж}}(x, t)$ – значение функции принадлежности оценки уровня жизни агента x в другом городе в такт времени t ;

E_1 – уровень недовольства агента x в такт времени t .

Накапливание уровня недовольства с течением времени выразим с помощью оператора алгебраической суммы, сохраняющего нормирование значений оценок от 0 до 1.

$$S_E(x, t) = S_E(x, t-1) + E_1(x, t) - S_E(t-1, x) \cdot E_1(x, t), \quad (3)$$

где t – такт модельного времени;

$E_1(x, t)$ – уровень недовольства агента x в такт времени t ;

$S_E(t)$ – уровень недовольства, накопленный агентом x к такту t ;

$S_E(t-1)$ – уровень недовольства, накопленный агентом x к такту $t-1$.

Перерасчет величины S_E проводится на каждом такте модельного времени. Порог накопления уровня недовольства нормируется в пределах от 0 до 1 и является индивидуальным для каждого агента. По достижении уровнем накопленного недовольства УН порогового значения ПУ, агент принимает решение о переезде.

Модель принятия решения агентом

Для формализации процесса принятия решения агентом был выбран аппарат теории автоматов, поскольку, с одной стороны, он соответствует принятой в психологии модели «стимул–реакция», а, с другой, легко реализуется современными программными средствами.

Теория бихейвиоризма, изучающая процессы принятия решений и различные аспекты поведения, описывает процесс осуществления некоторой целенаправленной деятельности следующим образом. Человек имеет набор потребностей и существует в некоторой среде. Среда воздействует на человека через разнообразные импульсы. Результатом столкновения потребности с импульсом, способным удовлетворить эту потребность, является мотивация. В зависимости от частоты и интенсивности поступления импульсов этот эффект может быть подкреплён (что с физиологической точки зрения соответствует усилению рецепторно-эффекторных связей между нейронами), либо угаснуть (связи ослабляются или исчезают). Следствием усиления связи до определенной степени является вызов реакции.

Модель принятия решения о миграции строится на основе общей схемы поведения, что позволяет придать решениям агента необходимую психологическую обоснованность. Наряду со структурой процесса принятия решения, необходимо учитывать качественные и количественные характеристики области принятия решений, т. е. перспектив миграции.

Состояние агента описывается набором нечетких переменных:

УЖ – уровень жизни агента в изучаемом городе;

ОУЖ – ожидаемый уровень жизни в другом городе;

УН – накопленный уровень недовольства агента;

ПУ – пороговый уровень недовольства.

В табл. 1 отражены сочетания управляющих переменных, определяющие каждое состояние автомата принятия решения о миграции (АПРМ).

Таблица 1

Состояния АПРМ

Условное обозначение состояния	Состояние	Сочетание управляющих переменных
q_0	Агент не имеет желания уезжать из города	$УЖ \geq ОУЖ$
q_1	Агент хочет, но не готов уехать из города	$УЖ < ОУЖ$ $УН < ПУ$
q_2	Агент готов уехать из города	$УЖ < ОУЖ$ $УН \geq ПУ$
q_3	Агент уехал из города	пересчет оценок

Представление переходов АПРМ в виде таблицы нерационально, поскольку при точности до сотых сочетание всех возможных входных сигналов и состояний имеет порядок 10^8 . Более наглядным является графическое представление (рис. 2).

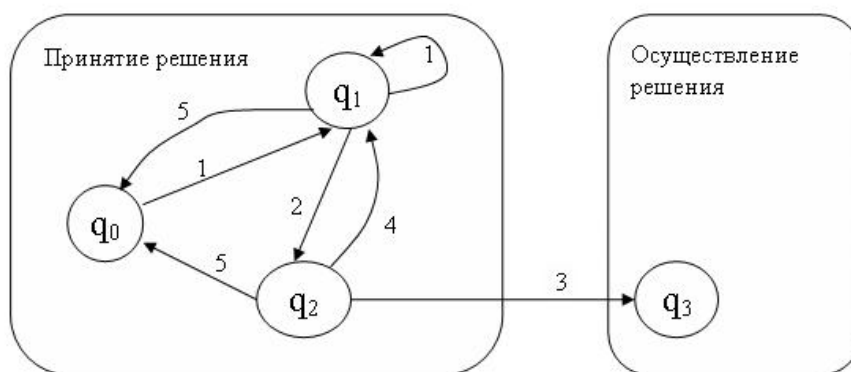


Рис. 2. Схема переходов АПРМ

В табл. 2 приведены изменения значений переменных состояния автомата, обуславливающие срабатывание переходов. Начальное состояние автомата будет определяться начальным распределением значений управляющих переменных.

Таблица 2

Переходы в АПРМ

Переход	Изменение управляющей переменной
1	Снижение УЖ; повышение ОУЖФ
2	Снижение ПУ; повышение УН
3	Пересчет оценок
4	Повышение ПУ; снижение УН
5	Повышение УЖ; снижение ОУЖФ

Выводы

Современный уровень развития математических методов предоставляет возможности анализа и прогнозирования социальных явлений с учетом присущей внешней среде неопределенности и ограниченной рациональности принимаемых человеком решений, связанной с неполнотой доступной информации об окружающем мире. Использование аппарата нечеткой логики позволяет получить оценки слабо формализуемых параметров социальной среды, близкие к реальным оценкам, которые люди формируют в повседневной жизни. Кроме того, работа с нечеткими оценками не требует значительных вычислительных мощностей, что особенно важно при планировании программной реализации модели, так как эти оценки должны строиться и корректироваться по мере выполнения алгоритмических секций для тысяч агентов.

Литература

1. Рыбаковский Л. Л. Миграция населения. Три стадии миграционного процесса – <http://www.i-u.ru/biblio/archive/migracia/1.aspx> (4.02.2011)
2. Алешковский И. А. Детерминанты внутренней миграции населения в России. Автореф. дисс. на соиск. ученой степени канд. экон. наук. М.: МГУ, 2007.
3. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.

**АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ АГЕНТНОЙ МОДЕЛИ
МИГРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ****О. А. Савина, А. Л. Савина (Орел)**

Миграционные процессы по своей сути являются социальными, однако на их протекание существенное влияние оказывают биологические и экономические факторы. В статье «Математические аспекты построения агентной модели миграционных потоков» выделены основные факторы, влияющие на миграционные процессы и предложены способы их формализации, оценки и учета при построении прогноза. В данной работе основное внимание уделяется таким аспектам как формирование структуры информационного обеспечения агентной модели миграционных потоков (АММП) и ее алгоритмическая реализация, основанная на предложенной системе нечетких оценок.

Поскольку поведение агента зависит от среды, в которой он существует, возникает необходимость структуризации поведения и определения влияния внутреннего представления организма об окружающем мире на его деятельность. Для решения задач моделирования в качестве базовой была выбрана модель TOTE (Test–Operate–Test–Exist), предложенная Д. Миллером, Ю. Галентером, К. Прибрамом в рамках теории биохейвиоризма [1]. Важнейшими понятиями в модели TOTE являются *План* и *Образ*.

План – это всякий иерархически построенный процесс в организме, способный контролировать порядок, в котором должна совершаться какая-либо последовательность операций. Когда человек выполняет *План*, он делает это шаг за шагом, завершая одну его часть и переходя к следующей. *Образ* – это все накопленные и организованные знания человека о себе самом и о мире, в котором он существует. *Образ* включает все оценки и факты, приобретенные и организованные человеком при помощи тех понятий, образов и отношений, которые он смог выработать. В агентной модели *Планами* будут являться алгоритмы, а система *Образов* определит структуру информационного обеспечения.

Информационное обеспечение АММП

При моделировании миграционных потоков значимыми являются следующие *Образы*:

1) Объективный *Образ Мира*, в данном случае небольшого города, содержащий информацию о наиболее значимых социальных институтах: домохозяйствах, рабочих местах и образовательных учреждениях.

2) Объективный *Образ Агента*, включающий информацию о личных и социальных характеристиках агента. К личным характеристикам относятся пол, возраст, уровень интеллекта и способностей. Наиболее важными социальными характеристиками являются семейное положение, образование, квалификация.

3) Субъективный *Образ Мира*, присущий отдельному агенту. В контексте задачи значимыми являются Субъективный *Образ Небольшого Города*, в котором проживает агент, и Субъективный *Образ Большого Города*, в который агент может переехать. Субъективный *Образ Небольшого Города* отражается в модели через набор субъективных оценок уровня жизни.

4) Субъективный *Образ Агента*. В реальном мире представление человека о самом себе включает широкий спектр знаний, умений, предпочтений и шаблонов поведения, полный учет которых в модели невозможен как в силу неполноты научных знаний о психике и мышлении, так и по причине огромной вычислительной сложности. Для решения задач, поставленных перед моделью, достаточно учитывать субъективные ха-

рактические «накопленный уровень недовольства» (УН) и «пороговый уровень недовольства» (ПУ).

Информационное обеспечение агентной модели миграционных потоков включает минимальный набор характеристик агента и внешнего мира, необходимый для построения перечисленных образов и реализации планов. Основными элементами информационной модели являются сущности (Агент, Домохозяйство, Рабочее место, Образовательное место, Жилое помещение) и взаимосвязи между ними. Информация, содержащаяся в сущности Агент, является основой для построения всех типов образов. В табл. 1 приведен перечень атрибутов сущности Агент с указанием образа, для формирования которого используется данный атрибут. Дополнительная информация, необходимая для построения объективного образа Небольшого Города, содержится в сущностях Домохозяйство, Рабочее место, Образовательное место и Жилое помещение.

Таблица 1

Атрибуты сущности Агент

Образ	Атрибут
Объективный Образ Мира	Номер агента
	Номер домохозяйства
	Номер рабочего места
	Номер образовательного места
Объективный Образ Агента	Пол
	Возраст
	Месяц рождения
	Семейное положение
	Социальный статус
	Уровень возможностей
	Уровень образования
	Специальность
Субъективный Образ Небольшого Города	Квалификация
	Уровень жизни
Субъективный Образ Небольшого Города	Ожидаемый уровень жизни
Субъективный Образ Агента	Накопленный уровень недовольства
	Пороговый уровень недовольства

Алгоритмическая реализация АММП

Целью моделирования является построение прогноза миграционной ситуации, то есть объективного образа небольшого города через некоторый промежуток времени, например, 20–30 лет. Изменение образа происходит по мере реализации планов двух уровней: уровня агента и уровня муниципального управления.

Планы первого уровня реализуют демографические и образовательные процессы, в которых участвует отдельный агент. Каждый из этих процессов непосредственно влияет на оценку уровня жизни, и, как следствие, на принятие решения о миграции. Поскольку в современном российском обществе отсутствуют запреты на смену места жительства, миграционные процессы происходят стихийно, а значит, корректная реа-

лизация планов первого уровня является необходимым условием для построения адекватного прогноза.

Планы второго уровня отражают возможности воздействия на миграционную ситуацию со стороны государства. К подобным Планам относятся программы развития регионов, создания рабочих и образовательных мест, обновление жилищного фонда.

Система Образов, отражающая миграционную ситуацию в регионе, изменяется по мере выполнения Планов. Планы являются агрегированным выражением важных событий, происходящих в жизни человека и влияющих на его цели, возможности и оценки. Планы реализуются в виде алгоритмов событийной модели [2], общая схема которой приведена на рис. 1.

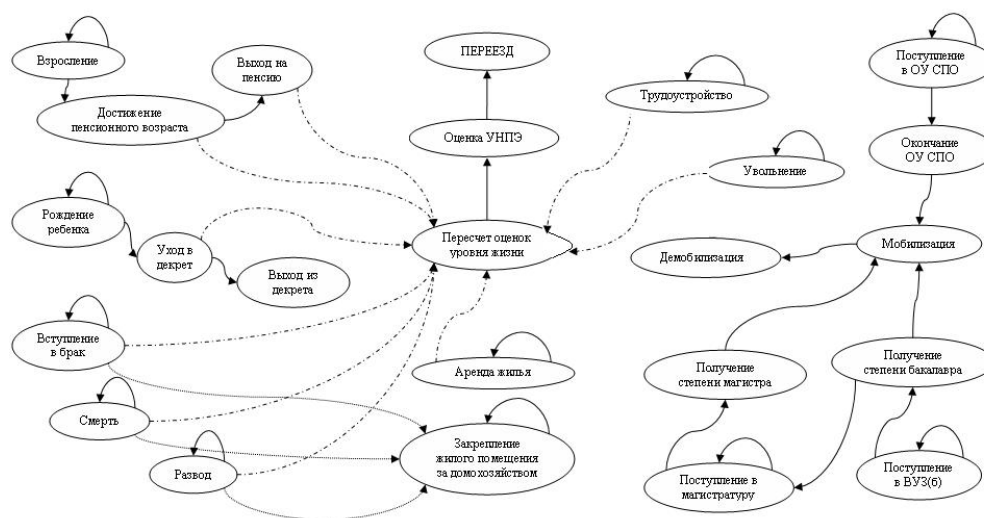


Рис. 1. Общая схема событийной модели миграционных потоков

Событийная модель складывается из четырех взаимосвязанных блоков:

1) блок «Демография» включает события: Взросление, Достижение пенсионного возраста, Вступление в брак, Рождение ребенка, Уход в декрет, Выход из декрета, Развод, Выход на пенсию, Смерть;

2) блок «Образование и трудоустройство», в который входят события: Поступление в образовательное учреждение среднего профессионального образования (ОУ СПО), Окончание ОУ СПО, Поступление в вуз на бакалавриат, Получение степени бакалавра, Поступление в магистратуру, Получение степени магистра, Мобилизация на военную службу, Демобилизация, Трудоустройство, Увольнение;

3) блок «Рынок жилья» состоит из события Аренда жилья, моделирующего поиск жилого помещения домохозяйством, не имеющим собственной жилой площади, и Закрепление жилого помещения за домохозяйством, в котором воспроизводится перераспределение жилых помещений в результате изменения состава домохозяйств, обусловленного событиями Вступление в брак, Развод, Смерть;

4) блок «Принятие решения», в рамках которого происходит пересчет оценок уровня жизни в небольшом городе (УЖ), ожидаемого уровня жизни в большом городе (ОУЖ), ожидаемого уровня жизни в большом городе с учетом ограничивающих факторов (ОУЖФ) и уровня накопленной психической энергии (УНПЭ) под влиянием событий из блоков «Демография», «Рынок жилья» и «Образование и трудоустройство».

Алгоритмическая реализация каждой секции связана с обращениями к сущностям базы данных, содержащей систему объективных и субъективных Образов. Алгоритм событийной секции «Трудоустройство» представлен на рис.2 [3]. Данный алгоритм ориентирован не на отдельных агентов, а на моделирование функционирования биржи

труда. Событие планируется на каждый такт модельного времени, так как на состояние рынка труда влияют многие процессы, моделируемые в других блоках, таких как Выход на пенсию, Уход в декрет, обуславливающие освобождение рабочих мест, и, с другой стороны, Окончание обучения в ОУ СПО, Получение степени бакалавра или магистра, в результате которых на рынок труда добавляются новые агенты.

Моделирование осуществляется последовательно для каждой укрупненной группы специальностей (УГС), востребованной на рынке труда. Алгоритм обращается к сущности «Агент» и запрашивает информацию обо всех агентах, находящихся в поисках работы (атрибут «Статус» установлен в состояние «ищет работу»), получивших образование по данной специальности. После этого из сущности Рабочее место выбираются все рабочие места, на которые требуются специалисты с соответствующей специальностью, и упорядочиваются по уровню заработной платы, начиная с максимальной, то есть с таких рабочих мест, на которые будет наибольшее число желающих.

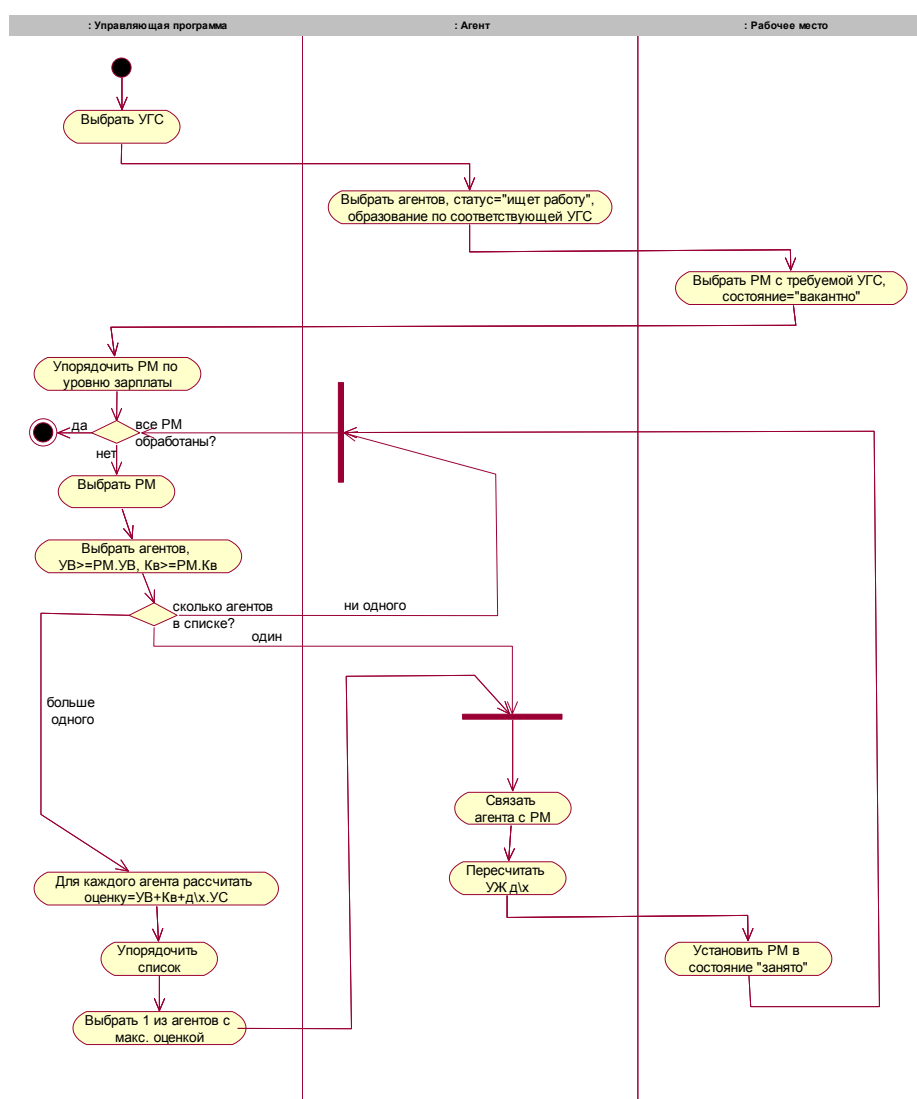


Рис. 2. Алгоритм событийной секции «Трудоустройство»

Пока список не пуст, с вершины его снимаются рабочие места и выбираются агенты, характеристики которых (уровень возможностей и квалификация) проходят минимальное пороговое значение, необходимое для получения рабочего места. Если

подходящих кандидатов нет, то начинается обработка следующего в списке рабочего места. Если кандидатов больше одного, то они упорядочиваются в соответствии с интегральной оценкой, рассчитываемой следующим образом:

$$\text{ИОК} = \text{УВ} + \text{Кв} + \text{УС}, \quad (1)$$

где ИОК – интегральная оценка кандидата; УВ – оценка уровня его возможностей; Кв – его квалификация; УС – оценка уровня связей, которыми обладают члены домохозяйства, которому принадлежит агент.

Список кандидатов упорядочивается по возрастанию ИОК и выбирается один кандидат с максимальной оценкой. В этом случае, так же, как если в списке всего один кандидат, выбранный агент связывается с рабочим местом, то есть устанавливается связь по внешнему ключу с сущностью «Рабочее место», а атрибут «Статус» сущности «Агент» принимает значение «работает». После этого рабочее место переводится в состояние «занято», а также происходит пересчет оценок уровня жизни членов домохозяйства, в котором состоит агент.

Выводы

Инструментарий агентного моделирования предоставляет возможности эффективного исследования социальных, в частности миграционных, процессов. Предложенная агентная модель миграционных потоков позволяет получить прогноз миграционной ситуации, изменения которой обусловлены решениями отдельных жителей, принимаемыми на основе системы нечетких оценок условий жизни. Модель разбивается на блоки, соответствующие природе отражаемых в них явлений: экономических (блоки «Образование и трудоустройство» и «Рынок жилья»), демографических (блок «Демография»), психологических (блок «Принятие решения»).

Объектами моделирования могут являться как отдельные населенные пункты (села, города), так и целые области, однако следует учитывать, что чем крупнее по размерам исследуемый объект, тем сложнее получить адекватные исходные данные для моделирования. Использование статистической информации является нецелесообразным в силу ее сглаженности и усредненности, что лишило бы агентов индивидуальности при принятии решения. Для наиболее полной реализации всех преимуществ агентного подхода в качестве исходных данных предпочтительнее использовать результаты социологических опросов и специализированных исследований рынков труда, образования и жилья в регионе.

Литература

1. Миллер Д., Галантер Ю., Прибрам К. Планы и структура поведения. История зарубежной психологии (30–60е гг. XX в.). М.: МГУ. С. 97–116.
2. Савина О. А. Имитационное моделирование экономических систем и процессов. Орел: ОрелГТУ, 2004.
3. Якобсон А., Буч Г., Рамбо Дж. Унифицированный процесс разработки программного обеспечения. СПб: Питер, 2002.

**ИНВАРИАНТНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПРОЦЕССАМИ****С. А. Селиверстов (Санкт-Петербург)**

Анализ транспортных процессов (ТП) – неотъемлемая часть функционально полного операторного базиса работы любой транспортной системы (ТС) [1]. Казалось бы, роль статистических методов при его выполнении должна объективно возрастать по мере неуклонного роста сложности ТС, ресурсного дефицита (прежде всего энергетического и коммуникационного) и роста неопределённости как внешней информационной среды функционирования ТС, так и внутренней, определяемой непредсказуемыми отклонениями её работы от равновесного (или устойчиво работоспособного) состояния. На практике же наблюдается иная картина – предпочтение отдаётся не научным методам анализа и управления сложными системами и процессами, а опыту и интуиции оператора или диспетчера. Причины такого положения кроются в том, что традиционные статистические методы анализа ТП, основанные на гипотезе неограниченной однородной генеральной совокупности (ГС) с априорно заданным законом распределения случайных событий и на параметрической оценке его адекватности наблюдаемым данным, неудовлетворительно работают на малых выборках и, главное, не учитывают фактора существования внутренней организованности наблюдаемого потока событий. Не секрет, что только согласованность внутренней организованности системы с внешними граничными условиями окружающей её информационной среды посредством постоянного во времени поиска состояния динамического равновесия системы является залогом её устойчивого функционирования [2]. Для примера достаточно сослаться на гомеостат У. Эшби [3], воплощающий в себе указанный принцип организации сложных систем.

Нужно сказать, что в последнее время появились работы, в которых данную проблему начинают осознавать. Однако до сих пор не ставится вопрос о поиске собственных спектров наблюдаемой совокупности данных, что отрицательно сказывается на эффективности и качестве результатов анализа ТП, являющихся предтечей процессов прогнозирования поведения сложных ТС и управления ими, и порождает скепсис у управленческого персонала. Не потому ли на практике так распространён гистограммный метод анализа случайных процессов ввиду его наглядности и предоставляемой возможности «живого общения» с анализируемым процессом? Но и здесь возникает ряд вопросов, на которые традиционная статистика не в состоянии дать однозначные ответы. Например, из каких соображений выбирать число интервалов гистограммы при стратификации наблюдаемой совокупности данных, какой должна быть величина интервала, что делать с «выбросами» в потоке событий (учитывать их или не учитывать), что делать с проявленными волнами плотности распределения потока (сглаживать их или не сглаживать) и, наконец, как избавиться от «проклятия» размерности выборки, оказывающей решающее влияние на результат и качество статистического анализа ТП? А ведь указанный анализ на практике проводится именно на выборках малой размерности ввиду высокой затратности, а часто и невозможности её увеличения.

Выход видится в отказе от декларации ГС, от априорного задания параметрического закона распределения значений наблюдаемых событий и в построении собственных спектров распределения с собственным, присущим только им, законом распределения, несущих в себе скрытую от глаз информацию о внутренней организованности анализируемых ТП. Эту и перечисленные выше проблемы предлагается решать, опираясь на инвариантную статистику [4], суть которой заключается в построении статистических инвариантов, с одной стороны, не зависящих от длины выборки случайных со-

бытий, но зависящих от граничных условий наблюдаемых данных, с другой. Указанные инварианты определяют масштаб флуктуаций и степень внутренней организованности данных и кладутся в основу генерации собственного спектра наблюдаемой совокупности случайных событий. Стало быть, отпадает необходимость обращения к ГС данных и в априорном задании закона их распределения.

Инвариантный статистический анализ включает определение *внешних и внутренних* граничных условий и определение *внутренней структуры* спектральных распределений случайных событий. **Внешние граничные условия** совокупности случайных событий образуют среднее значение совокупности случайных событий, предельные отклонения от среднего, дисперсию и статистические инварианты, вычисляемые как:

$$J_{k-1} = x_n^k / x_n^{k-1}, \quad k=2, n$$

(здесь x , n и k – соответственно параметр случайного события, количество событий, порядок центральных статистических моментов) и представляемые в дальнейшем дисперсным разложением.

При определении **внутренних граничных условий** сложное событие представляется *смесью простых с априори* заданным количеством резонансных ритмов. На практике преимущественно используются простые события с двумя или тремя резонансными ритмами. Определяются *вероятности возбуждения* и значение *размаха колебаний резонансных ритмов*.

Внутренняя структура распределения случайных событий характеризуется наличием в их спектрах резонансных ритмов, возникает как следствие установившегося равновесия между ресурсными возможностями анализируемой системы и внешними возмущениями информационной среды и задаётся: распределением ритмов наблюдаемых случайных событий, значениями вероятностей их возбуждения и значениями границ между резонансными ритмами (или стратами соответствующих им наблюдаемых случайных событий).

Построение распределения случайных величин, наиболее часто встречающегося на практике, простого события с тремя резонансными ритмами выполняется относительно среднего значения, входящего в состав внешних граничных условий. Ритмы, расположенные слева от среднего, получают посредством последовательного вычитания из него величины x_1 , а справа – посредством прибавления к нему величины x_2 с учётом величины $S = x_2 - x_1$ размаха колебаний резонансных ритмов простого события.

Значения вероятностей возбуждения ритмов вычисляются по формуле:

$$p = \frac{n!}{n_1! n_3! n_2!} \times p_1^{n_1} p_3^{n_3} p_2^{n_2},$$

где $n = n_1 + n_3 + n_2$, а n_1, n_3, n_2 – значения количеств резонансных ритмов, выбираемых из заранее построенной таблицы.

Стратификация спектральных распределений включает определение количества страт и значений их границ.

Количество страт зависит от количества резонансных ритмов, а границы между стратами определяются пересечением конусов, образованных рассеянием случайных величин двух соседних страт. Инвариантный статистический анализ завершается построением *графика спектрального распределения* наблюдаемых случайных событий в

координатах «вероятности возбуждения резонансных ритмов, их значения» и оценкой его адекватности с гистограммой/

Выводы

1. Принятая здесь концепция замещения континуальной системы алгебраической с дискретным множеством состояний использовалась ещё Архимедом при поиске равновесия жёстко связанной системы масс с плечами от неподвижной точки системы (центра масс). При таком замещении система замкнута и определена, если известны замещающие состояния и их веса. Оно успешно применялось механиками при поиске резонансных частот в связанных упругих механических системах. Сам же метод получил название «метод замещающих точек». Если множество статистических моментов и соответствующих им статистических инвариантов счётно, а количество инвариантов выбирается таким, чтобы закон распределения случайных событий восстанавливался однозначно вне зависимости от размера их выборки и без принятия гипотезы ГС. Такой метод замещения континуальных случайных процессов уместно назвать «методом статистических моментов или статистических инвариантов».

2. Априорное задание количества резонансных ритмов в простом случайном событии – единственное ограничение, накладываемое на представление сложного события смесью простых и несравнимо более слабое, нежели принятие гипотезы ГС с априори заданным законом распределения наблюдаемой совокупности событий. К тому же имеется алгоритмическая возможность обойти и это ограничение посредством перебора простых событий с разным количеством резонансных ритмов в них (а не только рассмотренных здесь двух и трёх) с целью выбора наиболее подходящего.

3. Приведённый выше порядок вычисления значений внешних и внутренних граничных условий поведения наблюдаемого потока случайных событий и определение его внутренней структуры хорошо поддаётся алгоритмизации и может быть погружён в компьютерную программу, входными данными которой будет служить дискретный ряд значений случайных величин, а выходными – график спектрального распределения событий. Выполняя мониторинг состояния объекта управления, можно не только обновлять указанный график, но и указывать на нём положение фазовой точки процесса управления и принимать в соответствии с ним требуемые управленческие решения.

4. О гистограммах. На практике построение гистограмм, как начального этапа группировки статистических данных, задаётся волевым образом. Множество данных, попадающих в каждую страту, сосредотачивается в её середине. Это означает, что в рамках статистической традиции допускается предположение о равномерности распределения однородных событий внутри страты. Такое предположение оправдано, когда речь идёт о неорганизованных или слабо организованных потоках событий. Но если потоки событий происходят в среде внутренних и внешних граничных условий, характеризующих асимметрией распределений, то условия однородности и равномерности нарушаются. Указанная асимметрия вызывает волны «ряби» на гистограммах, образующие тонкую структуру статистических распределений в виде дополнительного спектра частот. Эти волны имеют реальную физическую природу, а не являются парадоксом математической абстракции метода анализа, на что в своё время обратили внимание Гиббс (эффект Гиббса) и профессор МГУ А. Шноль. Важнейшая роль самих граничных условий проявляется не только в возможности корректировки резонансных спектров распределений, но и в возможности управления ими. Технология же выявления волн «тонкой структуры статистических распределений» будет полезна в анализе и прогнозе поведения сложных экономических систем и иных случайных процессов, на что в своё время обратил внимание Н. Кондратьев. Такие волны названы его именем.

Литература

1. **Белый О. В., Кокаев О. Г., Попов С. А.** Архитектура и методология транспортных систем. СПб.: Элмор, 2002. 249 с.
2. **Кокаев О. Г.** О самоорганизации транспортных процессов в транспортных системах // Транспорт. Наука. Техника. Управление. М.: ВИНТИ. 2006. № 4.
3. **Эшби У. Р.** Проблемы кибернетики. М.: Изд-во. иностр. лит., 1959.
4. **Трифанов В. Н.** Инвариантный статистический анализ и управление в транспортных системах. СПб.: Элмор, 2003. 190 с.
5. **Крейн М., Лемуан О.** Введение в регенеративный метод анализа моделей. М.: Наука, 1982.
6. Методы анализа данных. Подход, основанный на методе динамических сгущений / Под ред. Э. Диде. М.: Финансы и статистика, 1985.
7. **Рунион Р.** Справочник по непараметрической статистике. Современный подход. М.: Финансы и статистика, 1982.
8. **Бурков В. Н., Кондратьев В. В., Цыганков А. В., Черкашин А. М.** Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма. М.: Наука, 1984.
9. **Поспелов Г. С.** Научно-технический прогресс и проблемы планирования народного хозяйства. // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1982. Вып. 6.

В заключение выражаю благодарность канд. техн. наук Трифанову В. Н. за консультационную помощь при подготовке материала тезисов.

**КОМБИНИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
ПЛАНОВ ПРИМЕНЕНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ*****Б. В. Соколов, А. В. Иконникова, С. А. Потрясаев, Э. А. Рагиня (Санкт-Петербург)****Введение**

Основная особенность управления сложной технической системой (СТС) состоит в том, что сведения об основных факторах и условиях, влияющих на успешное решение задач автоматизированного управления (АУ) соответствующими объектами, имеют различную степень достоверности и определённости. Кроме того, существенно затрудняет процесс управления СТС отсутствие в большинстве случаев аналитической зависимости между указанными факторами и условиями, определяющими (описывающими) технологию АУ. Это, в первую очередь, касается факторов и условий, затрудняющих выполнение целевых задач объектами СТС (факторов противодействия внешней среды). Проиллюстрируем сказанное на примере реализации лишь одной из функций управления структурной динамикой СТС, а именно – функции планирования (программного управления). Так, традиционно при решении задач оперативного планирования работы различных классов технических средств, входящих в состав типовых СТС, в соответствующих детерминированных математических моделях не учитывается влияние факторов неопределённости (случайных, нечётких и т.п.), которые могут иметь место на этапе реализации составленных планов. В результате такого подхода устойчивость ранее составленных планов будет низкая, что, в свою очередь, приводит на этапе реализации планов к увеличению общего числа их коррекций, увеличению нагрузки на СТС, снижению её пропускной способности, устойчивости функционирования [17, 21, 22, 29].

Наряду с детерминированными моделями планирования операций и распределения ресурсов СТС существует ряд подходов, при которых в моделях планирования учитываются факторы неопределённости (модели нечёткого, стохастического математического программирования) [1–6]. Однако для решения задач планирования в рамках указанных моделей должны быть приняты довольно «жёсткие» предположения и допущения о параметрах законов распределения случайных (нечётких) величин, с помощью которых проводится описание процесса воздействия внешней среды на элементы и подсистемы СТС. Так, например, в моделях планирования, основанных на моделях стохастического программирования, как правило, делается предположение о том, что в результате воздействия внешней среды на элементы и подсистемы СТС появляются потоки отказов, представляющие собой случайные потоки пуассоновского типа, удобной вероятностной характеристикой которых является их интенсивность.

В том случае, если оказывается справедливой гипотеза о марковскости исследуемых процессов, становится возможным аналитическое описание моделей управления структурной динамикой СТС в условиях стохастического воздействия внешней среды.

Однако следует подчеркнуть, что даже при условии, когда известны все необходимые числовые характеристики случайной булевой функции, описывающей возможный сценарий возмущающих воздействия внешней среды, а также числовые характеристики законов распределения длительностей выполнения операций взаимодействия и соответствующих макроопераций, выполняемых в СТС, в конечном итоге процедуры

* Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 05–07–90088, № 10-07-00311, 10-08-90027-Бел_а, 11-08-01016, 11–08-00641), Института системного анализа РАН (проект 2.3).

поиска аналитических решений, как в задачах анализа функционирования СТС, так и в задачах выбора управляющих воздействий, значительно усложняются, особенно в условиях существенного увеличения размерности рассматриваемых задач УСД.

Многочисленные исследования, проведённые в данной области, показали [5–10], что учёт факторов неопределённости в моделях УСД СТС, вызванных различными причинами (критериальная неопределённость, возмущающие воздействия внешней среды и т.п.), целесообразно осуществлять в рамках полимодельной многоэтапной интерактивной процедуры в рамках соответствующей интегрированной системы поддержки принятия решений (ИСППР) [1, 7, 9, 12].

В указанных условиях выход из создавшегося положения связан с разработкой специального программно-математического обеспечения (СПМО) УСД СТС в рамках соответствующей ИСППР, которая представляет собой многомодельный иерархический комплекс, описывающий с требуемой степенью детализации процесс функционирования СТС и позволяющий решать разнообразные задачи анализа и оптимального выбора в различных условиях обстановки. Проводимая в ИСППР «сильная» интеграция аналитических, имитационных, логико-алгебраических, логико-лингвистических моделей, при которой происходит взаимная компенсация недостатков каждого из указанных выше классов моделей, позволяет получать качественно новые результаты при УСД СТС по сравнению с ранее существовавшими подходами.

Алгоритмы оценивания устойчивости программ управления СТС

Важная роль в решении перечисленных задач адаптационного планирования применения СТС отводится этапу оценивания устойчивости сформированных программ управления (планов применения) СТС. Анализ показывает, что в зависимости от состава и структуры исходных данных, их достоверности и определённости может быть предложено несколько вариантов процедур оценивания устойчивости программ управления (ПрУ) СТС. Рассмотрим три наиболее характерных варианта задания исходных данных (ИД): детерминированные ИД (вариант 1); стохастические ИД (вариант 2); ИД, заданные интервально (вариант 3).

В работах [4–9] было показано, что при задании стохастических ИД (вариант ИД 2), как и в варианте 1, для каждого полученного плана $\mathbf{x}_i^{(p)}(t)$ имитируются варианты целенаправленного воздействия внешней среды на элементы и подсистемы СТС, а также имитируются процессы оперативного управления в СТС на этапе применения. Однако в этом случае с максимальной полнотой воссоздаются все факторы неопределённости, связанные с действиями внешней среды. При этом для получения статистически значимых характеристик устойчивости планов применения СТС необходимо проведение многократных машинных экспериментов. В целях сокращения времени реализации указанных экспериментов предлагается в рамках создаваемой ИС и соответствующего СПМО использовать разработанные к настоящему времени высокоэффективные методы понижения дисперсии результатов моделирования [9–11].

Анализ показывает, что для стохастических ИД в качестве основного показателя, с помощью которого оценивается устойчивость комплексных планов применения СТС, целесообразно принять статистическую оценку вероятности выполнения целевой задачи, стоящей перед СТС на интервале планирования $(T_0, T_f]$:

$$\tilde{P}\left(\left\|\mathbf{x}_i^{(s)}(T_f) - \mathbf{x}_i^{(p)}(T_f)\right\| < \varepsilon_3^{(p)}\right), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_i^{(s)}(T_f)$ – случайный вектор, характеризующий состояние выполнения целевых задач СТС в конце интервала планирования в случае стохастических целенаправленных воздействий внешней среды на $\mathbf{x}_i^{(p)}(t)$.

В этом случае в соответствии с принципом допустимой гарантии [7, 10] условие устойчивости планов применения СТС может быть записано в следующем виде:

$$\tilde{P} \left\{ \left\| \mathbf{x}_i^{(s)}(T_f) - \mathbf{x}_i^{(p)}(T_f) \right\| < \varepsilon_3^{(p)} \right\} \geq \tilde{P}_g^{(1)}, \quad (2)$$

$$\tilde{\tilde{P}} \left\{ \left| \hat{J}_{il}^{(s)} - J_{il}^{(p)} \right| < \varepsilon_{4l}^{(p)} \right\} \geq \tilde{\tilde{P}}_{gl}^{(2)}, \quad (3)$$

где $\tilde{P}_g^{(1)}$, $\tilde{\tilde{P}}_{gl}^{(2)}$, $\varepsilon_3^{(p)}$, $\varepsilon_{4l}^{(p)}$ – заданные величины.

При проведении комплексного планирования возможны ситуации, когда ещё до решения задачи планирования может заранее задаваться необходимый уровень устойчивости планов в виде следующих условий [7, 10]:

$$P\{\hat{z}_n \geq z_\alpha\} = \alpha, \quad (4)$$

где z_α , α – заданные величины; $\hat{z}_n = \rho(\hat{\mathbf{x}}_i^{(s)}(T_f), \hat{\mathbf{x}}_i^{(p)}(T_f))$ – функция случайного вектора, позволяющая оценить отклонение возмущённой фазовой траектории (её i -го варианта) $\mathbf{x}_i^{(s)}(t)$ от плановой траектории $\mathbf{x}_i^{(p)}(t)$ в конце интервала планирования. Из соотношения (4) следует, что

$$z_\alpha = F_z^{-1}(1 - \alpha), \quad (5)$$

где $F_z^{-1}(1 - \alpha)$ – обратная функция к функции распределения $F_{z_i}(z_i)$ при значении аргумента, равного $(1 - \alpha)$ (квантиль распределения $F_{z_i}(z_i)$).

Тогда при оценке и выборе устойчивых к возмущающим воздействиям планов применения СТС необходимо наиболее пригодную альтернативу выбирать исходя из условия

$$z_\alpha(\mathbf{u}_i(t)) \geq z_g, \quad (6)$$

где z_g – допустимый уровень гарантированного (с вероятностью α) результата, связанного с отклонением $\mathbf{x}_i^{(s)}(T_f)$ от $\mathbf{x}_i^{(p)}(t)$.

Наряду с вышеперечисленными показателями устойчивость программ управления структурной динамикой СТС можно косвенно оценить, используя следующую целевую функцию [7, 10]:

$$M(J_{gi}^{(p)} - J_{fi}^{(s)}), \quad (7)$$

где M – математическое ожидание оценочной функции $(J_{gi}^{(p)} - J_{fi}^{(s)})$; $J_{gi}^{(p)}$ – обобщённый показатель эффективности применения СТС, полученный в результате свёртки

$J_{gi}^{(p)} = \left\| J_{1i}^{(p)}, \dots, J_{8i}^{(p)} \right\|_{t=T_f}^T$; $J_{fi}^{(s)}$ – показатель, с помощью которого оцениваются потери,

образуемые на этапе имитации функционирования СТС и обусловленные влиянием возмущающих воздействий на $\mathbf{x}_i^{(p)}(t)$ и необходимостью выбора регулирующих воздействий (дополнительным расходом ресурсов СТС), направленных на устранение указанных возмущений. В этом случае среди альтернативных планов применения СТС $\langle \mathbf{x}_i^{(p)}(t), \mathbf{u}_i^{(p)}(t) \rangle$, $i = 1, \dots, n$, удовлетворяющих условиям (2), (3), в качестве наилучшего плана (с точки зрения устойчивости к возмущающим воздействиям) следует выбрать тот план, у которого показатель (6) принимает максимальное значение.

Наряду с показателем (6) в качестве косвенных показателей оценки устойчивости планов могут быть приняты [7, 10]: вероятность того, что к некоторому моменту времени план не придётся корректировать; математическое ожидание момента времени, когда возникает необходимость коррекции плана; математическое ожидание числа коррекций плана на некотором временном промежутке.

Следует отметить, что в том случае, когда компоненты вектора $x_i^{(p)}(t)$ являются нечёткими переменными с заданными функциями принадлежности, по аналогии с вышеизложенным могут быть предложены соответствующие показатели устойчивости планов [7, 9, 10].

При интервальном задании ИД (вариант 3) будем предполагать, что область допустимых возмущающих воздействий $\Xi(x(t), t)$ будет описываться следующими соотношениями:

$$\xi_j^{(1)}(t) \leq \xi_j(t) \leq \xi_j^{(2)}(t), \quad j = 1, \dots, m, \quad (8)$$

где $\xi_j^{(1)}$, $\xi_j^{(2)}$ – соответственно заданные векторные функции, определяющие минимальные и максимальные значения возмущающих воздействий, которые могут появиться на этапе реализации каждого фиксированного плана применения СТС ($u_i(t)$, $t \in (T_0, T_f]$, $i = 1, \dots, n$) в рамках того или иного сценария воздействия внешней среды на СТС ($\xi_j(t)$, $t \in (T_0, T_f]$, $j = 1, \dots, m$). Пусть задано некоторое начальное состояние СТС $x(T_0)$ (см. (8)) и рассматривается некоторый фиксированный план её функционирования $u_i(t)$. Тогда указанным векторам и области возмущающих воздействий (23) для фиксированного сценария $\xi_j(t)$ соответствует область (множество) возможных значений фазовых переменных модели (1)–(2), т.е. множество различных фазовых траекторий.

Назовём эту область (множество) областью (множеством) достижимости динамической системы (СТС) вида (1)–(2) под воздействием возмущений и обозначим её следующим образом:

$$D_x^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, u_i). \quad (9)$$

Множеству $D_x^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, u_i)$ в пространстве состояний соответствует множество точек (область) в пространстве значений показателей, оценивающих эффективность и устойчивость функционирования СТС, которое мы обозначим как

$$D_J^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, u_i). \quad (10)$$

Для удобства и наглядности дальнейшего изложения рассмотрим только два компонента векторного показателя (10), которые соответствуют показателям результативности (J_1) и ресурсоёмкости (J_2) процесса функционирования СТС. В этом случае можно при геометрическом описании области достижимости (9) перейти от полярной системы координат к декартовой (см. рис. 1).

На рис. 1 показана область достижимости (9) для сокращённого вектора показателей эффективности и устойчивости функционирования СТС вида

$$J = \|J_1, J_2\|^T. \quad (11)$$

Пусть заданы допустимые границы изменений значений частных показателей результативности и ресурсоёмкости процесса функционирования СТС в виде следующих соотношений:

$$J_{a1} \leq J_1 \leq J_{b1}; \quad (12)$$

$$J_{a2} \leq J_2 \leq J_{b2}, \quad (13)$$

определяющих в пространстве показателей некоторую область P_J (см. рис. 1).

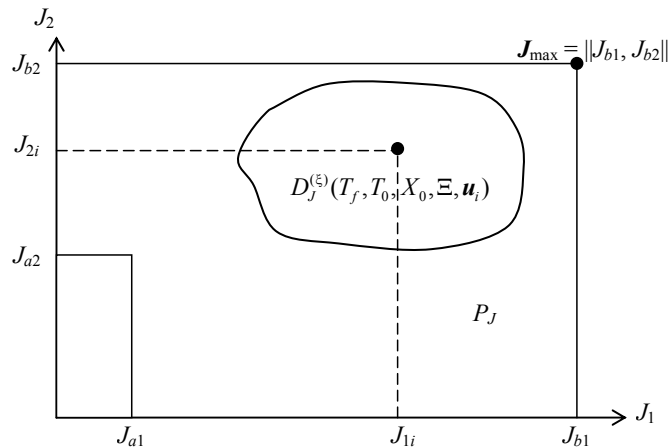


Рис. 1

В работах [1, 3, 4, 9, 11] показано, что если для некоторого фиксированного плана функционирования $u_i(t)$, ($i = 1, \dots, n$), подверженного влиянию возмущающих воздействий $\xi_j(t)$ вида (13), выполняются условия

$$D_J^{(\xi)}(T_f, T_0, X_0, \Xi, u_i) \subset PJ, \quad (14)$$

то программа управления $u_i(t)$ (план функционирования СТС) устойчива к воздействию возмущений $\xi_j(t)$. Другими словами, возможные отклонения значений показателей качества функционирования СТС вида J_1, J_2 , вызванные возмущениями $\xi_j(t)$, являются допустимыми.

Таким образом, для того чтобы оценить устойчивость $u_i(t)$ плана работы СТС к воздействию тех или иных возмущений $\xi_j(t)$, в случае их интервального задания, необходимо научиться строить соответствующие этим возмущениям области достижимости (ОД). В докладе представлены основные методики построения и аппроксимации ОД применительно к задаче оценивания устойчивости планов применения космических средств, осуществляющих управление системой "ГЛОНАСС".

Заключение

Исследования показали, что в целом учёт факторов неопределённости при управлении СТС должен осуществляться в несколько этапов и включать в себя [2, 7, 10, 12, 17]: адаптацию параметров и структуры моделей, алгоритмов УСД СТС к прошлому и текущему состоянию объектов управления (ОУ), управляющих подсистем (УП) и внешней среды; имитацию условий реализации плана с учётом различных вариантов организации оперативного управления элементами и подсистемами СТС в конкретных ситуациях; структурную и параметрическую адаптацию плана, моделей и алгоритмов СПМО УСД СТС к возможным (прогнозируемым на имитационных моделях) состояниям ОУ, УП и среды. В этом случае уже имеются основания говорить не об оптимизационном, а об адаптационном планировании применения СТС. Важную роль при реализации указанной технологии должны играть разработанные комбинированные алгоритмы оценивания устойчивости программ управления СТС.

Литература

1. **Васильев С. Н.** От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления, 2001. № 1. С. 5–22; № 2. С. 5–24.
2. **Воробьёв С. Н., Уткин В. Б., Балдин К. В.** Управленческие решения: учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003.
3. **Воронов А. А.** Введение в динамику сложных управляемых систем. М.: Наука, 1985.
4. **Жук К. Д., Тимченко А.А., Доленко Т. И.** Исследование структур и моделирование логико-динамических систем. Киев: Наукова думка, 1975.
5. Имитационное моделирование производственных систем / **А.А. Вавилов, Д.Х. Имаев, В.И. Плескунин и др.** М.: Машиностроение, 1983.
6. **Калинин В. Н., Соколов Б. В.** Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 56 – 61.
7. Методы организации адаптивного планирования и управления в экономико-производственных системах / **В.А. Забровский, Ю.В. Копейченко, В.И. Скурихин и др.** Киев: Наукова думка, 1980. 272 с.
8. Надёжность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдусевский (пред.) и др. Т. 3. Эффективность технических систем / Под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988.
9. **Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
10. **Полляк Ю. Г.** Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. М.: Сов. радио, 1971.
11. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики. 2002. №5. С. 103–117.
12. Технология системного моделирования / **Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов и др.**; Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. М.: Машиностроение, 1988.
13. **Тятюшкин А. И.** Многометодная технология для расчета оптимального управления // Теория и системы управления. 2003. №3. С. 45–51.
14. **Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К.** Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). М.: Наука, 1993.

ДИСЦИПЛИНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ С ПРЕРЫВАНИЯМИ, РЕАЛИЗУЕМЫЕ
СТАНДАРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ GPSS

В. В. Соснин (Санкт-Петербург)

Важнейший параметр любой неоднородной системы массового обслуживания (СМО) – дисциплина обслуживания (ДО), задающая правило выбора заявки на обслуживание из очереди ожидания. Подмножеством всех возможных ДО являются дисциплины обслуживания с прерываниями (ДОП), в которых обслуживание текущей заявки может быть прервано в зависимости от некоторого условия. Среди всех ДОП наиболее известна в ТМО ДО с абсолютными приоритетами (ДОАП).

Система имитационного моделирования GPSS является классическим инструментом исследования СМО. К сожалению, стандартные средства GPSS не позволяют моделировать работу ДОАП [1]. Для решения этой проблемы приходится использовать надстройки, которые ухудшают наглядность и масштабируемость модели, а также замедляют процесс моделирования. Целью автора было дать подробное описание всех ДОП, которые в GPSS реализуются с использованием лишь стандартных средств (такими средствами являются блоки SEIZE и PREEMPT). Обозначим множество таких ДОП аббревиатурой ДОПС. Перечень ДОПС с описанием их свойств окажется полезным всем программистам GPSS, так как позволит легко конструировать нужную ДОП, которая будет легкомасштабируемой, удобочитаемой и быстро работающей. В специальной литературе [2–5] данной проблеме почти не уделяется внимание, а справочная система GPSS очень кратко описывает свойства блоков SEIZE и PREEMPT, что крайне затрудняет процесс конструирования нужной ДОП. Для наглядности будем рассматривать модели СМО лишь с двумя классами заявок. Ограничивая общность полученных результатов, это допущение тем не менее позволяет сделать выводы, полезные для инженерного использования. К тому же, часто при моделировании систем с прерываниями большего числа классов и не требуется, так как абсолютным приоритетом обычно моделируются отказы или служебный трафик (т.е. строго один класс), а все остальные классы можно рассматривать как единый агрегированный класс с низким приоритетом.

Для краткости будем обозначать различные варианты ДОПС таким образом: "1-preempt-pr, 2-seize". Это значит, что в сегменте, имитирующем поведение высокоприоритетных заявок (ВЗ), используется блок PREEMPT с параметром PR, а в сегменте, имитирующем поведение низкоприоритетных заявок (НЗ), используется блок SEIZE. Таким образом, запись "1-preempt, 2-preempt" означает, что в обоих сегментах используются блоки PREEMPT без параметра PR.

ДОП1 вида "1-preempt-pr, 2-seize". Блок PREEMPT в первом сегменте работает в приоритетном режиме (т.е. входящая в него заявка может прервать обслуживание только менее приоритетной заявки, не учитывая, является ли сама прерываемая заявка захватчиком). Приведём только один раз соответствующий текст GPSS-модели (ВЗ имеют приоритет 2, НЗ – 1), а все последующие варианты ДОП имеют схожую структуру за исключением оговорённых особенностей блоков PREEMPT и SEIZE.

```
GENERATE (exponential(1,0,100)),,,,2
QUEUE    HighPriorLine
PREEMPT  pribor,PR
ADVANCE  (exponential(1,0,40))
RELEASE  pribor
DEPART   HighPriorLine
TERMINATE 1
```

```
GENERATE (exponential(1,0,100)),,,,1
QUEUE    LowPriorLine
SEIZE     pribor
ADVANCE  (exponential(1,0,40))
RELEASE  pribor
DEPART   LowPriorLine
TERMINATE 1
```

Используя рис. 1, покажем, что происходит в этой модели. На вход СМО поступает заявка одного из двух классов. Дальнейший путь её следования указан одной из стрелок. Если стрелка сплошная, то по соответствующему пути могут двигаться оба класса заявок; если стрелка пунктирная – могут двигаться только ВЗ; если стрелка штрихпунктирная – только НЗ.

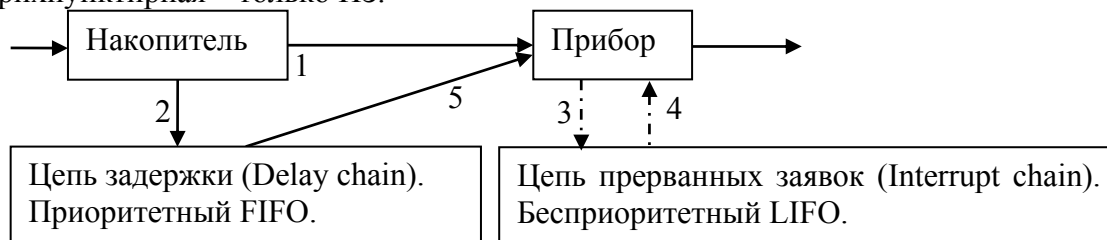


Рис. 1. Схема движения заявок при ДОП1

Путь следования заявки выбирается в соответствии с табл. 1. Прочерк в таблице означает, что на обслуживании в приборе отсутствуют заявки. После окончания обслуживания любой заявки в первую очередь на обслуживание попадают заявки из ЦПЗ в порядке LIFO (без учета приоритета), а лишь затем заявки из ЦЗ (в порядке FIFO с учетом приоритета).

Заметим, что в рассматриваемой модели в ЦПЗ могут находиться только НЗ. Это значит, что НЗ, находящиеся в ЦПЗ, попадут на дообслуживание ранее ВЗ, находящихся в ЦЗ. На рис. 1 это означает, что сначала произойдет движение заявок по стрелке 4, а лишь затем – по стрелке 5.

Таблица 1

Варианты обработки поступившей заявки в СМО с ДОП1

Тип заявки		Выполняемое действие
поступившей на вход	находящейся на обслуживании	
ВЗ	-	Поступившая заявка попадает на обслуживание в прибор (движение по стрелке 1)
НЗ	-	
ВЗ	ВЗ	Поступившая заявка попадает в ЦЗ (движение по стрелке 2)
НЗ	НЗ	
НЗ	ВЗ	
ВЗ	НЗ	Поступившая ВЗ попадает на обслуживание в прибор (стрелка 1), вытеснив из него НЗ, которая помещается в ЦПЗ (стрелка 3)

Если в прибор попадает заявка из ЦПЗ, то она дообслуживается с того момента, на котором была прервана, т.е. способ дообслуживания такой же, как в ДООП. Значит, ДОП1 отличается от ДООП только способом выбора из очереди кандидата на обслуживание после освобождения прибора: в ДООП на обслуживание всегда попадает наиболее высокоприоритетная из ожидающих в очереди заявок, а в ДОП1 на обслуживание может попасть прерванная НЗ. Очевидно, эта особенность скрадывает часть привилегий ВЗ.

ДОП2 вида "1-preempt, 2-seize". Блок PREEMPT в первом сегменте работает в режиме прерывания (происходит прерывание только тех заявок, которые сами ещё никого не прерывали; возможно прерывание заявок своего класса; значения приоритетов не учитываются). Подчеркнём, что хотя заявки в каждом из двух сегментов модели отличаются значением приоритета, но никакого влияния на ход моделирования эти зна-

чения не оказывают. Результаты моделирования не изменятся, если вообще не назначать приоритеты либо назначить любые другие приоритеты.

Рассмотрим схему обслуживания заявок при использовании ДОП2 (рис. 2). Здесь используются сразу три системных списка: ЦПЗ, ЦЗ и цепь ожидания захвата (ЦОЗ). ВЗ может прервать обслуживание только той заявки, которая сама не прерывала другую заявку. Это значит, что поступившая ВЗ в любом случае прервёт обслуживание НЗ, а в некоторых случаях прервёт и другую ВЗ (если та сама никого не прерывала).

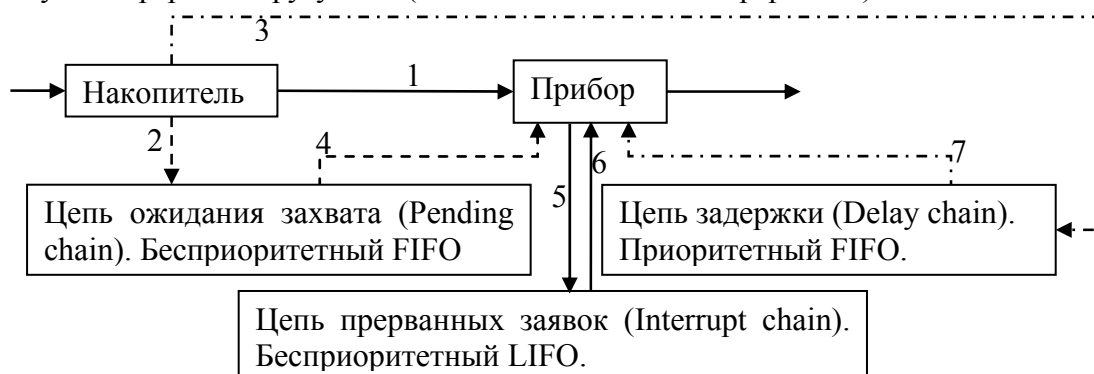


Рис. 2. Схема движения заявок при ДОП2

Варианты обработки поступившей заявки рассмотрены в табл. 2 (индекс i в аббревиатуре ВЗ i обозначает очередность поступления ВЗ). При завершении обслуживания какой-либо заявки выбор кандидата на обслуживание среди ожидающих в очереди заявок осуществляется в таком порядке:

- в беспriorитетном режиме FIFO выбирается заявка из ЦОЗ (стрелка 4);
- если ЦОЗ пуста, в режиме LIFO выбирается заявка из ЦПЗ (стрелка 5);
- если ЦОЗ/ЦПЗ пусты, в приоритетном режиме выбирается заявка из ЦЗ (стрелка 6).

Такой порядок выбора соответствует на рис. 2 просмотру слева направо указанных системных списков при поиске в них ожидающих заявок. В результате получается, что ДОП2 отличается от ДОАП лишь порядком обработки ВЗ. В ДОАП ВЗ не могут прерывать друг друга, а в ДОП2 это становится возможным. НЗ получают одинаковое обслуживание в обоих случаях.

Таблица 2

Варианты обработки поступившей заявки в СМО с ДОП2

Тип заявки		Выполняемое действие
поступившей на вход	находящейся на обслуживании	
ВЗ	-	Поступившая заявка попадает на обслуживание в прибор (движение по стрелке 1)
НЗ	-	
ВЗ2	ВЗ1, которая не прерывала чьё-либо обслуживание	ВЗ2 поступает в прибор (стрелка 1), вытеснив из него ВЗ1, которая направляется в ЦПЗ (стрелка 5)
	ВЗ1, которая прерывала чьё-либо обслуживание	ВЗ1 остается на обслуживании в приборе, а ВЗ2 направляется в ЦОЗ (стрелка 2)
НЗ	ВЗ	ВЗ остается в приборе, а НЗ поступает в ЦЗ (стрелка 3)
ВЗ	НЗ	ВЗ поступает в прибор, вытеснив из него НЗ, которая направляется в ЦПЗ (стрелка 5)

ДОПЗ вида "1-preempt, 2-preempt". Блок PREEMPT в обоих сегментах работает в режиме прерывания (происходит прерывание только тех заявок, которые сами ещё никого не прерывали; возможно прерывание заявок своего класса; значения приоритетов не учитываются). Снова подчеркнём, что хотя заявки в каждом из двух сегментов модели и отличаются значением приоритета, но никакого влияния на ход моделирования эти значения не оказывают. Результаты моделирования не изменятся, если вообще не назначать приоритеты либо назначить любые другие приоритеты. В этом режиме функционирования задействуются две системные очереди – ЦПЗ и ЦОЗ. Это показано на рис. 3. Заявки обоих классов движутся в модели одинаковым образом.

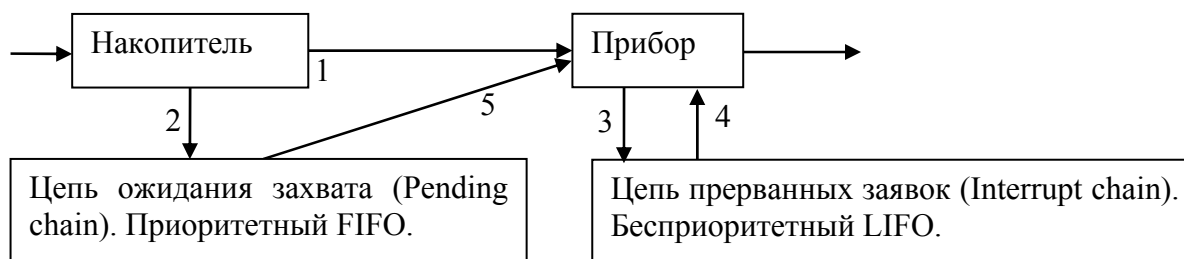


Рис. 3. Схема движения заявок при ДОПЗ

Если прибор свободен, то он занимается пришедшей заявкой. Если прибор занят обслуживанием заявки, не прерывавшей обслуживание других заявок, то такая заявка вытесняется пришедшей. Если прибор занят заявкой-захватчиком (т.е. она уже прерывала чье-либо обслуживание), то пришедшая заявка ждёт в очереди. Подробно выбор пути следования показан в табл. 3.

Таблица 3

Варианты обработки поступившей заявки в СМО с ДОПЗ

Тип заявки		Выполняемое действие
поступившей на вход	находящейся на обслуживании	
ВЗ	-	Поступившая заявка попадает на обслуживание в прибор (движение по стрелке 1)
НЗ	-	
НЗ2	Либо НЗ1, либо ВЗ, которые не прерывали чье-либо обслуживание	НЗ2 поступает в прибор (стрелка 1), вытеснив из него обслуживавшуюся заявку, которая направляется в ЦПЗ (стрелка 3)
	Либо НЗ1, либо ВЗ, которые прерывали чье-либо обслуживание	Обслуживаемая в приборе заявка остается на обслуживании, а поступившая НЗ2 направляется в ЦОЗ (стрелка 2)
ВЗ2	Либо НЗ, либо ВЗ1, которые не прерывали чье-либо обслуживание	ВЗ2 поступает в прибор (стрелка 1), вытеснив из него обслуживавшуюся заявку, которая направляется в ЦПЗ (стрелка 3)
	Либо НЗ, либо ВЗ1, которые прерывали чье-либо обслуживание	Обслуживаемая в приборе заявка остается на обслуживании, а поступившая ВЗ2 направляется в ЦОЗ (стрелка 2)

После завершения обслуживания какой-либо заявки выбор кандидата на обслуживание среди ожидающих в очереди заявок осуществляется в таком порядке:

- в беспriorитетном режиме FIFO выбирается заявка из ЦОЗ (стрелка 5);
- если ЦОЗ пуста, в режиме LIFO выбирается заявка из ЦПЗ (стрелка 4).

Это означает, что любая прерванная заявка не будет обслужена до тех пор, пока в системе будет хоть одна заявка любого класса в ЦОЗ. Поскольку приоритеты не оказывают никакого влияния на работу модели и в обоих сегментах стоят одинаковые блоки, то каждый класс получит одинаковое качество обслуживания. При этом будем считать, что качество обслуживания тем лучше, чем меньше среднее время пребывания в системе заявок определённого класса.

ДОП4 вида "1-preempt-PR, 2-preempt". Блок PREEMPT в первом сегменте работает в приоритетном режиме (т.е. входящая заявка может прервать обслуживание только менее приоритетной заявки, не учитывая, является ли сама прерываемая заявка захватчиком). Во 2-м сегменте блок PREEMPT работает в режиме прерывания (т.е. происходит прерывание только тех заявок, которые сами ещё никого не прерывали, в том числе и более высокоприоритетных заявок; возможно прерывание заявок своего класса; значения приоритетов не учитываются). Хотя приоритеты во втором сегменте не учитываются, они учитываются в первом сегменте. Поэтому значения приоритетов необходимо задавать явно. Рассмотрим на рис. 4 схему обслуживания заявок при использовании ДОП № 4. Эта схема похожа на рис. 2, однако состав стрелок отличается.

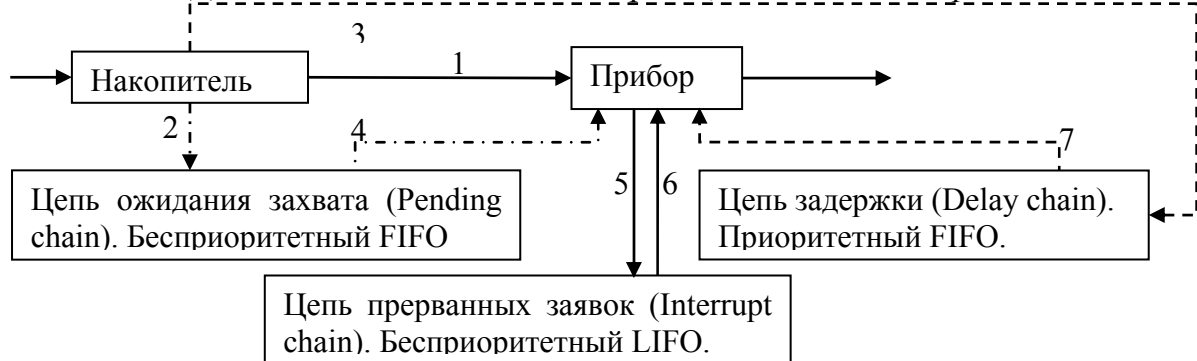


Рис. 4. Схема движения заявок при ДОП4

Порядок обработки транзактов при реализации ДОП4 является весьма запутанным. На первый взгляд кажется, что заявки поступают на обслуживание и вытесняются в совершенно бессистемном порядке. Например, некоторая Н32 может вытеснить В32, которая сама до этого никого не вытесняла. При этом впоследствии сама Н32 может быть вытеснена позже пришедшей В31 (В32 в это время ждёт в ЦПЗ). Если за время обслуживания В31 поступят Н31 и В33, то после завершения обслуживания В32 на обслуживание поступит сначала Н32 (так как она в этот момент находится в ЦОЗ), потом Н31 (поскольку она попала в стек-LIFO ЦПЗ после В31), потом В31 (она находится в ЦПЗ), В33 (она находится в ЦЗ). В итоге, на входе порядок поступления такой: В31–Н31–В32–Н32–В33, а на выходе В32–Н32–Н31–В31–В33, т.е. в среднем Н3 получили более высокое качество обслуживания, чем В3, так как прошли через систему быстрее. Подробно выбор пути следования заявок рассмотрены в табл. 4.

При завершении обслуживания какой-либо заявки выбор кандидата на обслуживание среди ожидающих в очереди заявок осуществляется в таком же порядке, что и при ДОП4:

- в беспriorитетном режиме FIFO выбирается заявка из ЦОЗ (стрелка 4);
- если ЦОЗ пуста, в режиме LIFO выбирается заявка из ЦПЗ (стрелка 5);
- если ЦОЗ/ЦПЗ пусты, в приоритетном режиме выбирается заявка из ЦЗ (стрелка 6).

Таблица 4

Варианты обработки поступившей заявки в СМО с ДОП4

Тип заявки		Выполняемое действие
поступившей на вход	находящейся на обслуживании	
ВЗ	-	Поступившая заявка попадает на обслуживание в прибор (стрелка 1)
НЗ	-	
НЗ2	Либо НЗ1, либо ВЗ, которые не прерывали чьё-либо обслуживание	НЗ2 идёт в прибор (стрелка 1), вытеснив из него НЗ1 или ВЗ, которая направляется в ЦПЗ (стрелка 3)
	Либо НЗ1, либо ВЗ, которые прерывали чьё-либо обслуживание	Обслуживаемая в приборе заявка остаётся на обслуживании, а НЗ2 направляется в ЦОЗ (стрелка 2)
ВЗ2	НЗ	ВЗ2 поступает в прибор (стрелка 1), а вытесненная НЗ направляется в ЦПЗ (стрелка 5)
	ВЗ1	ВЗ1 остаётся на обслуживании в приборе, а поступившая ВЗ2 направляется в ЦЗ (стрелка 3)

Такой порядок выбора соответствует на рис. 4 поочерёднему просмотру слева направо указанных системных списков на наличие в них ожидающих заявок. Попробуем проанализировать, заявки какого класса при ДОП № 4 получают преимущественное обслуживание в СМО. С одной стороны, любую НЗ может прервать вновь пришедшая ВЗ. Однако рассмотрим, что произойдёт за время обслуживания ВЗ-захватчика в СМО. За это время в СМО поступит n штук ВЗ и m штук НЗ. Все n поступивших ВЗ будут направлены в ЦЗ. Все m поступивших НЗ будут направлены в ЦОЗ. А как мы видели раньше, на обслуживание в первую очередь выбираются заявки из ЦОЗ. Поэтому можно смело утверждать, что все m НЗ пройдут на выход СМО ранее всех n ВЗ. Значит, НЗ должны получить лучшее качество обслуживания. Однако это утверждение справедливо, если потоки ВЗ и НЗ соразмерны либо если поток ВЗ больше потока НЗ, так как только при этом ВЗ будут долго ждать. Если же поток ВЗ намного меньше потока НЗ, то ВЗ лишь изредка будут попадать в ЦЗ, которая просматривается в последнюю очередь, а большую часть времени они будут находиться в ЦПЗ, в которой их качество обслуживания не зависит от приоритета.

Приведённые данные об особенностях реализации каждой из ДОП позволяют однозначно спрогнозировать, какой из двух обслуживаемых классов заявок получит преимущественные условия. Кроме того, становится возможным сравнивать различные ДОП между собой. Например, если потоки обоих классов заявок простейшие, то расположить ДОП по мере возрастания преимущества высокоприоритетного класса следует так: ДОАП, ДОП2, ДОП1, ДОП3.

Проделанная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. количество ДОП, реализуемых стандартными средствами GPSS ограничено;
2. ДОП, реализуемые стандартными средствами GPSS, обладают следующими преимуществами: прогон имитационной модели осуществляется быстрее, модель является легкомастшабируемой, программный код модели удобочитаем;
3. выявленные свойства и характеристики ДОПС облегчают программисту GPSS процесс конструирования нужной ДО.

Литература

1. **Соснин В. В.** Моделирование дисциплины обслуживания с абсолютными приоритетами в GPSS World // Сборник докладов ИММОД-2007. СПб., 2007. Т. 1. С. 224–229.
2. **Рыжиков Ю. И.** Имитационное моделирование. Теория и технологии. СПб: Корона принт, 2004. 384 с.
3. **Бражник А. Н.** Имитационное моделирование: возможности GPSS World. СПб: РенOME, 2006. 439 с.
4. **Томашевский В., Жданова Е.** Имитационное моделирование в среде GPSS. М.: Бестселлер, 2003. 413 с.
5. **Боев В. Д.** Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: Учебное пособие. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 368 с.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ
СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ РОССИИ И УКРАИНЫ*****М. Е. Степанцов (Москва)**

Проблема моделирования транспортных перевозок, проектирования и организации функционирования транспортных сетей далеко не нова. Однако большая часть существующих моделей транспортных систем ориентирована на решение одного и того же, пусть и крайне важного, вопроса о построении оптимального в том или ином смысле плана перевозок. В таких моделях подразумевается, что все функционирование транспортной сети управляется из одного центра. При этом либо решается просто задача оптимизации перевозок в рамках существующей неизменной сети (например, [1]), либо изменения в структуре транспортной сети, ее развитие также рассматриваются как результат принятия некоего решения центром управления транспортной сетью и реализации этого решения [2]. Между тем, в условиях наличия большого количества хозяйствующих субъектов эти предположения нельзя считать верными.

В [3] была предложена модель, описывающая на языке математики процесс самоорганизации (возникновения и развития) транспортной сети, происходящий не на основании некоторого единого плана, а самопроизвольно складывающийся при заданных географических условиях и параметрах спроса и предложения нескольких видов товаров.

Основной идеей модели является введение для каждого вида товаров величины, названной потенциалом. Потенциал численно характеризует потребность в данном товаре, существующую в данном узле транспортной сети. Именно разность потенциалов между узлами и создает в модели потоки товаров.

Модель представляет собой полный граф, каждой вершине и каждому ребру которого приписан определенный набор параметров и переменных. Вершины моделируют узлы сети и характеризуются следующими величинами:

- 1) размер узла V_i ;
- 2) выпуск продукции вида k P_{ik} (отрицательное значение означает спрос на продукцию);
- 3) потенциал продукции каждого вида ϕ_{ik} .

Ребрам графа, изображающим транспортные коммуникации, связывающие населенные пункты, соответствуют следующие величины:

- 1) длина $L_{ij} > 0$;
- 2) коэффициент затрат на расширение Q_{ij} ;
- 3) пропускная способность $W_{ij} \geq 0$;
- 4) поток продукции вида k S_{ijk} .

Кроме этого, модель характеризуется глобальными параметрами «коэффициент проторенного пути» $N > 1$ и «коэффициент роста узлов» $G > 0$. Первый из них показывает, во сколько раз затраты на прокладывание новой дороги с некоторой пропускной способностью превышают затраты на расширение существующей дороги на ту же величину.

Динамика модели реализована с использованием дискретного времени, шаг которого можно условно положить эквивалентным году реального времени – традиционному для экономики отчетному и плановому периоду. В связи с этим возникла известная методологическая проблема, свойственная, например, традиционным разностным схемам – дискретный характер пространства и времени противоречил бы континуаль-

* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 11-06-00193-а.

ном свойствам переменных. Поэтому уместно было положить, что все величины (кроме коэффициентов Q_{ij} , N , G , не являющихся переменными модели) также могут принимать только целые значения.

Начальное состояние модели задается набором значений V_i , P_{ik} , L_{ij} , Q_{ij} , W_{ij} и глобальных параметров. Пошаговое изменение состояния модели осуществляется в два этапа, которые носят принципиально различный характер. Первый этап состоит в установлении схемы перевозок товаров при существующих значениях спроса, предложения и возможностях транспортировки. Следует отметить, что в рамках модели эта схема складывается не путем выбора оптимального (в каком-либо смысле) способа перевозок, а через самопроизвольное установление маршрутов перевозки, каждый из которых «закрывает» некоторую часть спроса на данный вид товара.

Номер вида продукции k играет роль индикатора значимости продукции. На каждом шаге алгоритма для каждого значения k , меняющегося от 1 (номер наиболее значимой продукции) до максимального (номер наименее значимой продукции), в каждой вершине рассматривалась задача оптимизации:

$$|\varphi_{ik}| \mapsto \min \quad (1)$$

при ограничениях

$$\forall j \sum_k |S_{ijk}| \leq W_{ij}, \quad (2)$$

где значения потенциалов заданы выражением

$$\varphi_{ik} = \sum_j S_{ijk} + P_{ik} \quad (3)$$

К задаче (1), (2) применяем следующий метод. Поскольку $S_{ijk} \in Z$, то для каждого значения k значение S_{ijk} увеличивалось на 1, если $\varphi_{ik} > \varphi_{jk}$ или уменьшалось в обратном случае, и не меняется при равенстве потенциалов. При переборе ребер приоритет отдается ребрам с наибольшей разностью потенциалов между вершинами. Если для данного ребра итерационный процесс останавливается из-за нарушения условия (2), будем говорить, что имеет место перегрузка ребра.

Следует отметить, что такой алгоритм, применяемый для каждого вида товаров, нельзя строго назвать решением задач (1, 2). Он как раз и моделирует спонтанное установление торговых маршрутов между вершинами транспортной сети.

После этого на втором этапе шага по времени осуществляется изменение параметров вершин и ребер. Размер вершин является также динамической величиной и меняется в зависимости от уровня потока товаров через данную вершину. При изменении размера вершины выпуски продукции всех видов в этой вершины изменяются пропорционально.

Для всех ребер, на которых возникла перегрузка, проверяется возможность увеличения их пропускной способности, и при наличии такой возможности пропускная способность увеличивается.

Более подробное описание модели, а также примеры тестовых расчетов приведены в [4].

Таким образом, на каждом шаге устанавливается некоторое распределение потоков товаров, не являющееся ни равновесным, ни оптимальным в классическом смысле этих терминов, а стихийно складывающееся на основе структуры спроса и предложения данного вида продукции в узлах сети.

Предложенный подход был применен для моделирования в железнодорожных системах России и Украины. Следует указать, что необходимые для построения соответствующих моделей первичные данные (например, объемы существующих перевозок) являются секретными или вовсе отсутствуют. В связи с этим калибровка модели в обоих случаях проводилась на основе оценок необходимых величин, исходя из доступных вторичных данных.

Моделирование железнодорожной системы России

При построении модели российской железнодорожной системы рассматривались только основные железнодорожные магистрали нашей страны, по которым осуществляется основной объем перевозок.

В качестве видов продукции, используемых в модели, были выбраны следующие группы товаров:

- 1) лесоматериалы;
- 2) металлы;
- 3) нефть и нефтепродукты;
- 4) товары народного потребления.

В качестве вершин графа в модели были выбраны основные железнодорожные узлы России, а также 5 городов приграничных стран, с которыми осуществляется наибольший объем трансграничных перевозок.

Данная модель была использована для «проигрывания» ряда сценариев развития железнодорожной системы России.

1. Развитие, исходя из существующей на данный момент ситуации.

При прогнозировании на период до 50 лет, считая от 2009 года, наблюдается постепенное сокращение перегрузки железных дорог, с окончательным решением этой проблемы к концу срока. Наибольшее позитивное влияние транспортная сеть оказывает на развитие Москвы, дальневосточного региона и западных приграничных территорий.

2. Отсутствие железнодорожного сообщения с Дальним Востоком.

Несмотря на прекращение сообщения по весьма загруженной магистрали и первоначальных проблем с функционированием системы, уже через 10 лет развитие узлов сети выходит на уровень, полученный в сценарии 1, за тем лишь исключением, что снабжение товарами Владивостока осуществляется через Харбин. Таким образом, можно сделать вывод, что железнодорожное сообщение с Дальним Востоком является не столько крайней экономической необходимостью, сколько средством сохранения целостности России в этом регионе.

3. Прекращение железнодорожных перевозок на Украину и в Белоруссию.

В описанной ситуации экономическое развитие значительной части узлов, особенно на европейской территории России замедляется по сравнению со сценарием 1. Сохранение нормального железнодорожного сообщения с указанными странами важно, особенно с учетом анализа аналогичной модели, касающейся Украины.

4. Прекращение железнодорожного сообщения с Калининградом.

Если в модели удалить узел Калининград, это приведет к замедлению (по сравнению со сценарием 1) развития практически всех узлов, в первую очередь, Москвы. С другой стороны, узлы, соответствующие альтернативным маршрутам перевозок в Европу (Киев, Минск, Петербург), наоборот, начнут развиваться быстрее.

Моделирование железнодорожной сети Украины

В качестве видов продукции, используемых в модели, были выбраны следующие группы товаров:

- 1) металл;

- 2) уголь;
- 3) сельскохозяйственная продукция.

Как и в случае с Россией, вначале был рассмотрен сценарий развития сети железных дорог, исходя из существующей на данный момент ситуации. Затем в рамках модели было закрыто сообщение с европейскими странами и Россией соответственно.

Во всех трех случаях страна справится с перегрузками железных дорог через 40–50 лет, считая от настоящего времени. В обоих случаях ограничения перевозок существенного влияния на динамику развития системы не оказали. Единственным отличием является более быстрое развитие Одессы в рамках сценария с ограничением перевозок в Европу. Тогда этот порт становится наиболее очевидным альтернативным маршрутом перевозки и развивается быстрее. Во всем остальном наличие или отсутствие грузовых перевозок между Украиной и ее соседями не оказывает заметного влияния на экономическое развитие страны.

Следует подчеркнуть, что во всех рассматриваемых моделях речь шла только о грузовых перевозках, пассажирские не рассматривались.

Подводя итог, отметим, что, используя предложенную модель, мы получили ряд интересных качественных результатов. Разумеется, говорить о количественных характеристиках не представляется возможным без использования для калибровки моделей точных (а не оценочных) исходных данных.

Литература

1. Бутов А. С., Гаскаров Д. В., Егоров А. Н., Крупенина Н. В. Транспортные системы. Моделирование и управление / Под ред. Бутова А.С. СПб.: Судостроение, 2001.. 552 с.
2. Попков Ю. С., Посохин М. В., Гутнов А. Э., Шмудьян Б. Л. Системный анализ и проблемы развития городов. М.: Наука, 1983. 512 с.
3. Малинецкий Г. Г., Степанцов М. Е. Дискретная математическая модель динамического развития транспортной сети // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2009. Т. 49, N 9. С. 1565–1570.
4. Степанцов М. Е. Динамическая модель развития транспортной сети. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2008. № 79.

**ИМИТАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ КООРДИНАЦИИ
СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ*****А. Я. Фридман, О. В. Фридман (Апатиты)**

Основным преимуществом имитационных моделей по сравнению с аналитическими является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели учитывают наличие дискретных или непрерывных элементов, нелинейные характеристики, случайные воздействия и др. Поэтому имитационное моделирование широко применяется на этапе проектирования сложных систем.

Имитационные модели не только по свойствам, но и по структуре соответствуют моделируемому объекту, поскольку имеется однозначное и явное соответствие между процессами, получаемыми на модели, и процессами, протекающими на объекте.

Имитационное моделирование позволяет имитировать поведение системы во времени, имеется возможность управлять временем в модели: замедлять в случае быстропротекающих процессов и ускорять для моделирования систем с медленной изменчивостью. Кроме того, имеются средства для имитации поведения объектов, реальные эксперименты с которыми дороги, невозможны или опасны.

При моделировании сложных динамических систем не удается учесть достаточно большого числа реальных факторов, поскольку это чрезмерно усложняет модель. Поэтому в модель приходится вводить лишь ограниченное число таких факторов, которые по тем или иным соображениям считаются наиболее существенными.

Возможны два подхода: не учтенные в описании модели факторы считают несущественными и полностью игнорируют при принятии решений с использованием этой модели, или не вводят явно "несущественные факторы" в модель, но учитывают их влияние, допустив, что отклик модели на то или иное воздействие известен лишь приближенно или нечетко.

В работе [1] представлена реализация второго подхода путем исследования чувствительности результатов многокритериальной оптимизации поведения объекта моделирования к изменениям исходных данных и внутренних характеристик системы.

С помощью системы визуального блочного математического моделирования VisSim [2] на примере двухуровневой системы управления линейным объектом проанализированы предложенные в работах [3, 4] необходимые и достаточные условия координируемости локально организованной иерархии динамических систем. Цель анализа состояла в выявлении диапазонов устойчивости локальных управлений и координирующих сигналов к небольшим изменениям динамических характеристик объекта управления (вариациям, в том числе структурным) и уровней задающих воздействий. Кроме того, оценивались возможности повышения быстродействия иерархической системы.

Исследования проводились для управляемого объекта, представляющего собой три последовательно соединенных линейных звена с передаточной функцией второго порядка, одним управляющим входом и одним выходом каждый. Рассматривалась двухуровневая система управления, состоящая из трех управляющих элементов нижнего уровня, каждый из которых вырабатывал сигнал управления "подведомственным" ему звеном управляемой системы, и одного координирующего элемента верхнего уровня.

В качестве элементов второго уровня используются три аналогичных друг другу локальных управляющих элемента. В каждом из них вычисляется градиент обобщенно-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-07-00066), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект 2.3 в рамках текущей Программы фундаментальных научных исследований) и Президиума РАН (проект 4.3 Программы № 15).

го критерия [3, 4], его значения подаются в качестве управляющего воздействия на входы блоков управляемой системы.

Управляющие элементы нижнего уровня использовали для принятия решений (выработки управляющих воздействий) только локальную информацию о состоянии подчиненных им звеньев управляемого объекта, координатор обладал полной информацией о состоянии этого объекта и управляющих элементов нижнего уровня, что соответствует принципам теории иерархических систем [5]. Для принятия решений все управляющие элементы использовали представленный в [6] обобщенный критерий затрат. Результаты моделирования показали, что при пошаговом изменении управляющих воздействий на отдельные линейные звенья с использованием в качестве "стабилизирующего" значения обобщенного критерия затрат, вычисляемого для каждой подсистемы на каждом шаге моделирования, диапазон устойчивости системы в целом расширяется. Таким образом экспериментально подтверждены выводы, сделанные в работе [4], об устойчивости результатов децентрализованного управления на основе градиентов (приращений) локальных критериев качества.

Для исследованной двухуровневой системы управления линейным объектом подключение нижнего уровня управления в среднем на порядок расширяет диапазоны устойчивости системы к внешним возмущениям и примерно вдвое уменьшает процент расхождения идеальной и реальной траекторий системы.

Подключение блока координации позволяет повысить устойчивость системы к внешним возмущениям более чем вдвое, увеличить быстродействие системы приблизительно вдвое, расширить диапазон устойчивости системы к структурным возмущениям в полтора – два раза (по сравнению с локальным управлением).

В работах [1, 3, 4, 6–9] по методике, описанной для иерархической управляемой системы [1], проведено моделирование поведения децентрализованной системы управления сетью объектов (рис. 1).



Рис. 1. Упрощенная схема децентрализованной системы управления сетью объектов

Проанализирована устойчивость моделируемой системы к внешним возмущениям. Для этого на каждый узел сети поочередно подавался сигнал, соответствующий 10%-ному внешнему возмущению.

Далее определялись диапазоны устойчивости системы к малым внутренним возмущениям, реализованным путем добавления обратных связей между выходами и входами узлов сети (в направлении от общего выхода системы к общему входу). Диапазон устойчивости определялся по той же методике, что и для иерархической системы (отклонение по амплитуде $\pm 5\%$). Проанализированы все возможные сочетания связей "вход–выход".

Затем выявлялись диапазоны устойчивости системы при поочередном подключении управления на каждый узел сети. Управления задавались пропорционально градиенту обобщенного критерия [3, 4], его значения вводились в качестве управления по одному на вход каждого из возбуждаемых узлов сети.

Исследовано поведение системы при одновременном подключении всех управляющих элементов, возбуждение подавалось только на один узел сети. Определены диапазоны устойчивости для такой ситуации.

Следующий шаг эксперимента – подключение координатора по той же схеме, как в иерархической системе. Блок координации подключался только на возбуждаемый узел и на все узлы сети с одиночным подключением управления (на возбуждаемый узел сети) и полным подключением управления (на все узлы сети).

Для двухуровневой системы управления сетевым объектом выявлено разделение внутренних обратных связей на "сильные" (возмущение, подаваемое на эти связи, существенно влияет на поведение системы в целом) и "слабые". Поочередное подключение локальных управлений в среднем на порядок расширяет диапазоны устойчивости соответствующих "сильных" связей к внешним возмущениям и практически не влияет на "слабые" связи. Локальное одиночное управление тем узлом сети, на который подано возмущение, достаточно эффективно компенсирует небольшие структурные возмущения и более чем вдвое уменьшает процент расхождения идеальной и реальной траекторий системы в целом. Полное подключение нижнего уровня управления ведет к резкому сужению диапазонов устойчивости "сильных" связей (в 2–4 раза) и появлению реакции на невозбуждаемых узлах сети. Следовательно, некоординируемые локальные управления "мешают" друг другу, что и можно было предположить с учетом особенностей сетевых структур.

Полное подключение управления и координации (на все узлы сети) для "слабых" связей практически ничего не изменило с точки зрения величины диапазона устойчивости. Для "сильных" связей диапазон устойчивости расширился, в целом реакция системы на возмущение стала слабее. Таким образом, полное подключение управления и координации дает наилучший эффект при компенсации малых структурных возмущений.

Градиентные методы сравнительно просты в реализации, но в общем случае применимы только к системам, где неопределенность порождается случайными событиями и процессами (иногда для их описания применяют термин "игры с природой"). Проблема состоит в том, что в реальных системах сложно априорно определить, имеется ли сознательное противодействие сигналам координатора. На описанных выше этапах моделирования возмущение на отдельные узлы исследуемых систем подавалось «вручную», в каждый момент времени было известно, какой именно узел модели подвергается внешнему (или внутреннему, структурному) воздействию. В реальных системах эта информация отсутствует, поэтому следующим этапом моделирования стала разработка метода поиска «возмущенного» узла моделируемой системы.

Для решения этой задачи в качестве поискового блока предлагается использовать нейронную сеть [11]. В среде Matlab моделировались нейронные сети различной структуры: линейный слой, однонаправленная сеть, каскадная направленная сеть, перцептрон и самоорганизующаяся карта. Исследования показали, что наилучшее распознавание дает однонаправленная сеть. Структура сети предельно упрощена, сеть состо-

ит из двух слоев, в первом слое 9 нейронов, каждый из которых соответствует узлу моделируемой системы, во втором слое – 1 нейрон. На рис. 2 приведена упрощенная структура сети.

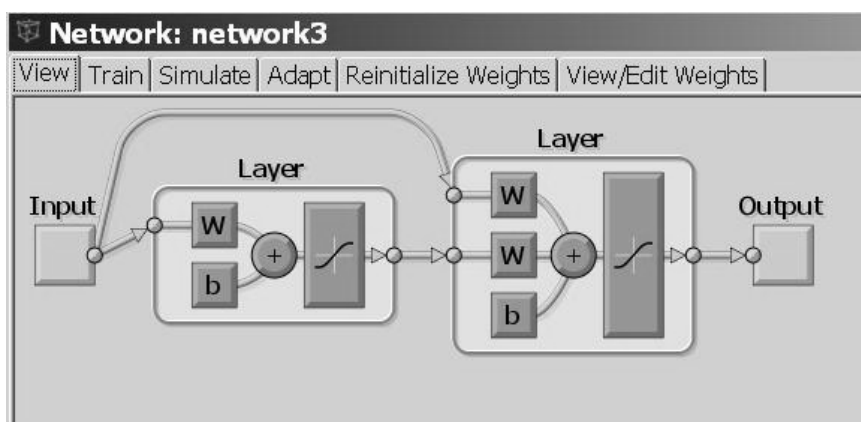


Рис. 2. Структура однонаправленной сети

Для обучения и тестирования сети использовались результаты предыдущих этапов «ручного» воздействия на систему. Обученная сеть должна определять «возмущенный» узел системы.

В настоящее время исследована распознавательная способность сети при подаче внешнего возмущения на каждый узел моделируемой системы. Как показали исследования, на внешнее возмущение реагируют только «сильные» узлы системы. Обучение проводилось в условиях 10%-ного внешнего возмущения. После обучения сеть однозначно распознает узел, на который подано внешнее возмущение, как с большей амплитудой, так и с меньшей, чем в обучающей выборке. Кроме того, исследовались ситуации, когда возмущение разной амплитуды подавалось на несколько узлов моделируемой системы. Сеть определяет возмущенные узлы, но для оценки степени их возмущения требуется дообучение сети, что будет сделано в дальнейшем.

Кроме того, будут проведены работы по распознаванию узлов моделируемой системы при возникновении внутренних структурных возмущений, информация о локализации возмущения в системе будет передаваться на уровни управления и координации.

Следующим этапом работы является полное подключение управления и координации (на все узлы моделируемой системы) при использовании нейронной сети для получения информации о локализации возмущения в системе, что позволит координатору принять решение о воздействии на выявленный узел.

Прогнозируется, что использование нейронной сети в качестве поискового блока должно вести к повышению быстродействия децентрализованных систем управления сетевыми структурами.

Выводы

1. Использование предложенного градиентного метода координации для сетевого объекта позволяет:

- повысить устойчивость системы к внешним возмущениям и свести к минимуму взаимное влияние узлов сети, если локальные управляющие элементы не искажают намеренно информацию, передаваемую на уровень координатора,
- расширить диапазон устойчивости системы к структурным возмущениям более чем в два раза, как и для двухуровневой системы управления линейным объектом.

2. Для поиска «возмущенного» узла моделируемой системы в качестве поискового блока использовалась односторонняя сеть, которая показала хорошую распознавательную способность.

Литература

1. **Фридман А. Я., Фридман О. В.** Ситуационное моделирование иерархической многоцелевой системы // Труды Всероссийской конференции "XXXV Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова" (Владивосток, 31 августа–5 сентября 2010 г.). С. 892–898.
2. **Дьяконов В. П.** VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 384 с. (Сер. Полное руководство пользователя).
3. **Фридман А. Я.** Достаточные условия координируемости локально организованной иерархии динамических систем / Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы (ИИ-2009) // Материалы X Международной научно-технической конференции. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. С. 115–117.
4. **Фридман А. Я.** Условия координируемости двухуровневого коллектива динамических интеллектуальных систем // Одиннадцатая национальная конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008 (28 сентября – 3 октября 2008 г., Дубна, Россия): Труды конференции. Т. 1. М.: ЛЕНАНД. 2008. С. 25–31.
5. **Месарович М., Мако Д., Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
6. **Фридман А. Я.** Ситуационный подход к моделированию промышленно-природных комплексов и управлению их структурой. // Труды IV международной конференции "Идентификация систем и задачи управления". М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2005. С. 1075–1108.
7. **Фридман А. Я., Фридман О. В.** Градиентный метод координации управлений иерархическими и сетевыми структурами // Информационно-управляющие системы 2010. № 6. С. 13–20.
8. **Fridman Alexander, Fridman Olga.** Gradient Coordination Technique for Controlling Hierarchical and Network Systems // Systems Research Forum. 2010. Vol. 4. № 2. P. 121–136.
9. **Fridman Alexander, Fridman Olga.** Incremental Coordination in Collaborative Networks // Proceedings of International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT-2010), October 18–20, 2010, Moscow, Russia [Электронный ресурс] (CD-ROM). Paper № 1569337294.
10. **Козюкова Т. И.** Координируемость многокритериальных взаимосвязанных задач линейного программирования // Методы принятия решений в условиях неопределенности. Рига, 1980. С. 99–107.
11. **Городецкий А. Е., Тарасова И.Л.** Управление и нейронные сети. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. 312 с.

МОДЕЛИ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ

В. М. Чадеев, Н. И. Аристова (Москва)

Введение

Мировая экономика виртуальна. Она только косвенно, через акции, связана с производством. Основной критерий, по которому она работает, – максимизация прибыли, а основной инструмент – спекуляции с ценными бумагами. Эти спекуляции, конечно, влияют на прибыль предприятий, но критерии работы предприятий, выпускающих реальную продукцию, другие. Основная цель их работы – выпуск продукции, удовлетворяющей определенным требованиям, с наименьшими затратами труда. Критерии спекулятивной и реальной экономики могут противоречить друг другу.

Качество модели во многом определяет и результаты моделирования. Небольшие, казалось бы, детали или малые параметры, отбрасываемые для упрощения модели, могут привести к совершенно неудовлетворительным результатам, никак не связанным с действительностью. Это относится, например, к уровню брака. На некоторых хорошо организованных производствах уровень брака на технологических операциях не превышает нескольких процентов, и тем не менее игнорирование этих потерь может привести к занижению трудозатрат в тысячи раз.

В работе рассматриваются модели, в которых производство представляется как набор технологических операций, включая транспортные.

В реальной экономике цель автоматизации производстве заключается в повышении производительности труда, т. е. уменьшении участия человека в технологическом процессе и соответственно снижении себестоимости изделия. При этом цена изделия на будущем рынке при оптимизации производства для изготовления конкретного изделия не играет роли.

Основные предположения

Представим себе процесс изготовления продукции в виде последовательности технологических операций. Поскольку основным инструментом повышения производительности труда является автоматизация, будем рассматривать только автоматизированное производство. Автоматизация, как правило, не полная: на практике всегда остаются технологические операции, которые может выполнить только человек. Одни технологические операции может выполнять только человек, другие только автомат, а некоторые операции могут выполнять и люди, и автоматы. Перераспределяя работу между ними можно минимизировать затраты человека на выпуск единицы продукции. При этом, естественно, необходимо учитывать и затраты времени людей на изготовление автоматов. Ведь для их изготовления использовались какие-то технологические операции.

Все окружающее нас многомиллионное разнообразие искусственно созданных объектов, от предметов потребления до автострад и космических кораблей, сделано с помощью технологических операций. Видов технологических операций сравнительно немного, около тысячи, и в то же время, этого набора достаточно, чтобы изготовить и стандартный автомобиль, и неповторимое произведение искусства.

Под технологической операцией будем понимать общепринятое ее значение, имея в виду такие операции, как токарная обработка, фрезерование, сверление, сборка, ориентирование детали и т.п., однако в дальнейшем нам потребуется некоторое формализованное описание любой технологической операции, удобное для целей моделирования.

Будем характеризовать технологическую операцию двумя параметрами: временем выполнения a и вероятностью ее правильного выполнения q . Как время выполнения операции, так и вероятность ее правильного выполнения зависят от многих причин, в частности, от квалификации рабочего, от станка, на котором она выполняется, от качества заготовки. Часто одна и та же технологическая операция может быть выполнена вручную рабочим или автоматически, без участия человека.

Затраты на изготовление изделия складываются из затрат на отдельные технологические операции. Можно написать для затрат времени рабочего на изготовления изделия

$$A = \sum_i^m a_i n_i, \quad (1)$$

где a_i – время выполнения технологической операции i -го вида человеком, n_i – общее количество технологических операций i -го вида, необходимое для изготовления всего изделия, m – общее количество видов технологических операций.

При этом нужно иметь в виду, и это принципиально важно, что изготовленное изделие будет годным только с вероятностью

$$P = \prod_i^m q_i^{n_i}, \quad (2),$$

где q_i – вероятность правильного выполнения технологической операции i -го вида человеком.

Формула (1) определяет общие затраты человека на изготовление изделия (неизвестно годного или нет), а средние затраты на изготовление годного изделия будут больше

$$A^* = A / P. \quad (3)$$

Формула (3) определяет средние затраты на изготовление годного изделия при ручном изготовлении. Заметим, что вероятности в (2) перемножаются, а это значит, что изготовить годное изделие из большого числа деталей практически невозможно. Если вероятность брака на одной операции 0,99, то вероятность без ошибок выполнить 1000 операций равна 0,000043. С этим борются с помощью контроля. Об этом позже.

Если некоторые технологические операции выполняются не человеком, а автоматом, то схема вычисления затрат изменится. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Автоматизация

Если некоторые технологические операции выполняются автоматом, то время, затраченное на изготовление изделия, будет равно

$$C = \sum_i^m (1 - \beta_i) a_i n_i + \sum_i^m \beta_i b_i n_i, \quad (4)$$

где b_i – время выполнения технологической операции i -го вида автоматом, β_i – уровень автоматизации технологических операций i -го вида, необходимых для изготовления всего изделия. Уровень автоматизации должен удовлетворять условиям

$$0 \leq \beta_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

Если все технологические операции операции i -го вида выполняются автоматом, то уровень автоматизации β_i равен 1, если человеком, то 0.

Изготовленное изделие будет годным с вероятностью

$$P = \prod_i^m q_i^{(1-\beta_i)n_i} p_i^{\beta_i n_i}, \quad (6)$$

где p_i – вероятность правильного выполнения технологической операции i -го вида автоматом.

Формула (4) задает время изготовления изделия. Первая сумма – затраты времени человека, вторая – автомата. Любой автомат имеет ограниченное время жизни. Поэтому, чтобы автомат смог выполнить все технологические операции во второй сумме, в (4) должно соблюдаться условие физической возможности

$$TP > \sum_i^m \beta_i b_i n_i, \quad (7)$$

которое означает, что за время своей жизни автомат изготовит одно годное изделие.

Самовоспроизведение

Рассмотрим задачу частичного самовоспроизведения промышленных роботов. Если роботы будут тратить часть своего ресурса на изготовление таких же роботов, то уменьшится часть ресурса, доступная пользователям роботов (рабочее время роботов). При учете этих дополнительных трат стоимость единицы рабочего времени робота будет равна

$$\lambda(\beta) = \frac{\sum_i^m (1-\beta_i) a_i n_i}{TP - \sum_i^m \beta_i b_i n_i}, \quad (8)$$

при условии физической возможности (7).

Некоторые свойства функции (8) удалось определить аналитически. Например, доказано, что при фиксированном времени выполнения операций оптимальное (в данном случае минимальное) значение $\lambda(\beta)$ достигается, когда компоненты вектора β суть только нули и единицы. То есть все технологические операции одного вида должны выполнять или только люди, или только роботы.

Имитационное моделирование

Попытки моделировать экономические процессы предпринимались уже давно. Одним из первых это сделал наш лауреат Нобелевской премии Л. В. Канторович [1, 2]. В его работах была предпринята попытка оптимизировать экономику путем перераспределения ресурсов между тяжелой и легкой промышленностью. В то время это был прорыв в науке. Сегодня уже понятно, что оптимизация реальной экономики возможно только на уровне технологических операций, а не изделий. Дело в том, что количество наименований изделий, изготавливаемых мировой промышленностью, составляет миллионы, а под технологические операции Международная федерация робототехники отела всего 1000 позиций. То есть необходимо автоматизировать выполнение всего 1000 видов технологических операций, а не изготавливать разные автоматы для изготовления разных изделий. Это означает, что если создан автомат, выполняющий какую-либо технологическую операцию, например закручивающий гайки, который повышает производительность труда, то его выгодно применять и в легкой, и в тяжелой промышленности – везде, где необходимо выполнить эту технологическую операцию.

Выводы

Модели для имитационного моделирования реальной экономики существенно отличаются от моделей виртуальной (спекулятивной экономики). Это следует учитывать при проведении имитационного моделирования.

Литература

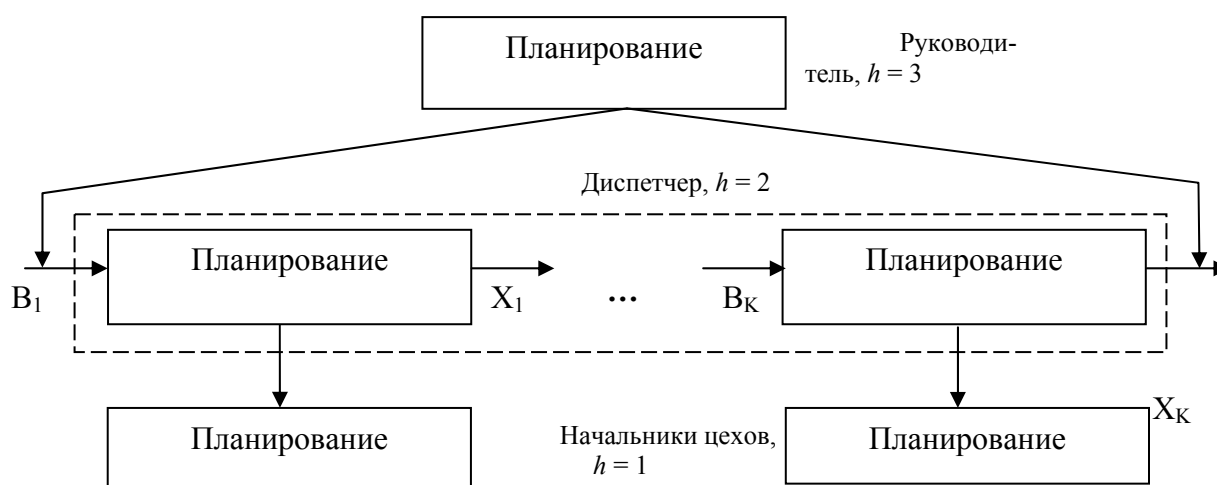
1. **Канторович Л. В.** Математические методы организации и планирования производства. Л., изд-во ЛГУ, 1939.
2. **Канторович Л. В.** Экономический расчет наилучшего использования ресурсов. М.: изд-во АН СССР, 1959.
3. **Чадеев В. М.** Стратегия автоматизации//Автоматизация в промышленности. 2003. № 2–4.

ИМИТАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ЛИНИИ ПРОИЗВОДСТВА

В. Д. Чертовской (Санкт-Петербург)

Введение

В серийном судо-, машино- и приборостроительном производстве планирование как процесс (рис. 1) характеризуется трехуровневой структурой [1]. Отличительной ее особенностью является взаимодействие структурных элементов разных уровней $h = 3$ (руководство) и $h = 1$ (начальники цехов) с уровнем $h = 2$ (диспетчер) по вертикали и взаимодействие элементов уровня $h = 2$ по горизонтали (технологическая цепочка).



Процесс оптимального многоуровневого планирования, позволяющего наилучшим образом использовать имеющиеся ресурсы, с применением задачи статического линейного программирования (СЛП) для описания отдельных элементов в теоретическом плане рассмотрен в работе [1]. Задача СЛП имеет вид

$$DN \leq X \leq DV ; \quad (1)$$

$$BN \leq AX \leq BV ; \quad (2)$$

$$G = CX \rightarrow \max , \quad (3)$$

где X – вектор искомого плана; DN, DV – векторы нижнего и верхнего ограничений на план; A – матрица норм расходов ресурсов; C – вектор прибыли от единицы плановой продукции; BN, BV – векторы нижней и верхней границ ресурсов. Выходом является вектор X , входом – вектор $B = (BN, BV)$. Трудности численного моделирования элемента заключаются в специфике задачи многоуровневого планирования и получении информации для таких расчетов из реальной системы.

Прикладное многоуровневое планирование выполняется преимущественно для отдельных структурных элементов. В то же время требуется математическая модель для процедуры взаимодействия элементов и прежде всего по горизонтали. Исследованию такой модели посвящена настоящая работа.

Постановка задачи. Прикладное моделирование процедуры горизонтального согласования экономических интересов, определяемых целевыми функциями, характеризуется двумя моментами.

1. Чтобы провести расчет планов, необходимо иметь не только реальные числовые данные, но и отлаженную модель.

2. Отладка модели связана с необходимостью сочетания алгоритмов отдельных структурных элементов: значения выходов предыдущего элемента должны быть значениями входов последующих элементов.

Использование для такого моделирования задач СЛП при «движении» от первого элемента к последнему связано со следующими затруднениями:

задачи отдельных элементов могут быть несовместными и потребуются дополнительные решения;

даже если задачи отдельных элементов совместны, решения конечного элемента могут не совпасть с заданными. Добиться совпадения подбором – задача комбинаторная и не всегда успешная.

Требуется, таким образом, формирование задачи, позволяющей рассчитывать план в технологической цепочке от конца к началу и являющейся, по сути, в определенной степени задачей, обратной задаче СЛП.

В решении задачи имитации следует выделить два этапа: формирование на статистической основе описания отдельных элементов структуры, обеспечение описания их взаимодействия с позиций согласования экономических интересов.

Решение задачи. В формировании описания необходимо рассмотреть описание отдельных элементов и их связей.

Для числового моделирования отдельного автономного элемента использован алгоритм статистического синтеза Р. Габасова [2].

Алгоритм описания отдельного элемента уровня $h = 2$ с использованием задачи линейного программирования состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Задание размерности задачи.

Шаг 2. Статистический синтез числовых значений для вектора плана (выхода):

for j:=1 to N do

begin

X[j]:=Rand1(30.0,50.0); /*X в пределах $[X_{\min}, X_{\max}]$ */

if X[j]<33 then

begin

DN[j]:=X[j];

DV[j]:=50;

DEL[j]:=Rand1(35.0,39.0);

end;

где DEL – вектор оценок.

Шаг 3. Статистический синтез коэффициентов матрицы **A** по схеме, аналогичной использованной на шаге 2.

Шаг 4. Определение необходимых ресурсов и коэффициентов целевой функции по алгоритму, представленному следующим фрагментом 1:

Фрагмент 1

CX:=0;

for j:=1 to N do

begin

C[j]:=DEL[j];

for i:=1 to M do

```

C[j]:=C[j]+A[i,j]*Y[i];
CX:=CX+C[j]*X[j];
end;

```

где Y – вектор потенциалов.

Далее использован модифицированный алгоритм, в котором все перечисленные параметры неотрицательны, $DN = BN = 0$, что имеет место в организационно-экономических системах. Назовем модифицированный алгоритм исходным.

Приведем пример генерации математического описания элемента в виде задачи СЛП:

$3 \leq M \quad 3 \leq N$					
C, 390.78 371.73 267.23					
DN			DV		
0.00	0.00	0.00	363.16	274.26	310.24
BN			BV		
0.00	0.00	0.00	341.29	423.53	291.46
A					
11.50		8.80		5.60	
11.40		12.90		8.50	
8.20		7.50		6.80	

Правильность формирования и достоверности результата подтверждена многочисленными решениями сгенерированных задач СЛП в рамках таблиц Excel и пакета MatLab.

Описанный алгоритм может использоваться для исследования элементов уровня $h = 1$ и применен для генерации описания:

уровня $h = 2$ в статическом и динамическом вариантах;
уровня $h = 3$.

Для формирования модели согласованной технологической цепочки в статическом варианте введены дополнительные условия $(0, BV)_k = (0, DV)_{k-1}$, $BV_k = DV_{k-1}$, где k ($k = 1, K$) – номер элемента.

Для последнего элемента значения плана вводятся в режиме диалога. В этом же режиме может быть задана и матрица A .

Для имитации процесса горизонтального согласования требуется формирование несогласованной технологической цепочки, в которой выход X и матрица A задаются в режиме диалога.

Имитировать процесс горизонтального согласования экономических интересов элементов возможно по следующему алгоритму.

Шаг 1. В соответствии с вариантом 4 находятся параметры B_1 , X_K , A , C в предположении, что интересы согласованы.

Шаг 2. Изменяются в диалоговом режиме коэффициенты целевой функции для получения «несогласованного» элемента. Этим элементом может быть, не снижая общности, первый элемент.

Шаг 3. Находятся по предложенному алгоритму значения целевых функций $G_k^{(1)}$, $k = K, 1$ от конца цепочки к началу.

Шаг 4. Определяются с помощью задач ДЛП значения целевых функций $G_k^{(2)}$, $k = 1, K$ при «движении» от начала цепочки к концу.

Шаг 5. Вычисляются величины $\Delta G_k = G_k^{(1)} - G_k^{(2)}$. Далее в соответствии с работой [1] можно использовать метод равновесия по Нэшу.

Положим, что локальные ограничения выполняются полностью.

Чтобы обеспечить план, нужно движение по цепочке от конца к началу.

Можно считать, что для элементов $k = 1, n$ величина $\Delta G_k < 0$, а для элементов $k = n+1, K$ ($n, n+1 \in 1, K$) $\Delta G_k > 0$.

Тогда в интересах системы в целом целесообразно дополнительный выигрыш

$$\sum_{r=n+1}^K \Delta G_r$$

перераспределить с учетом элементов $k = 1, n$ по правилу

$$\delta F_k = (\sum_{r=n+1}^K |\Delta G_r| |\Delta G_k|) / \sum_{k=1}^K |\Delta G_k|. \quad (4)$$

В этом случае компромиссным (равновесным) решением будут значения целевых функций

$$G_k = \begin{cases} G_k + \delta G_k, & k = 1, n, \\ G_k - \delta G_k, & k = n+1, K. \end{cases} \quad (5)$$

Предложенная схема имитации обладает широкими возможностями. Укажем лишь некоторые.

1. С помощью предложенного варианта имитации возможно *учесть* временную динамическую составляющую. Для этого вводится понятие временных интервалов $r = 1, R$, на которых работает цепочка элементов. Программно интервалы вводятся циклами, число которых задается в режиме диалога. На каждом интервале вручную вводится матрица $\mathbf{A}$ для каждого элемента. Для интервала $r = 1$ задается в диалоге план для последнего элемента в цепочке. Кроме того, для всех интервалов с индексом $r > 1$ вводится составляющая ΔB дополнительных ресурсов для корректировки плана при переходе от элемента к элементу. Результаты решения приведены в таблице, в которой первое число в названии файла – номер временного интервала, а второе число – номер задачи в цепочке. Согласование интересов может проводиться на каждом интервале времени.

2. Схема позволяет синтезировать процесс планирования для более высокого уровня иерархии ($h = 3$, руководство). Для этого сохраняются значения ресурсов (входа) B_1 и плана (выходов) X_K технологической цепочки, а эквивалентная матрица $\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \dots \mathbf{A}_K$, где K – количество элементов в технологической линии. Коэффициенты вектора целевой функции C определяются из выражений фрагмента 1.

3. Теперь возможно провести моделирование процесса перехода на выпуск новой продукции. Пусть до момента времени $r = 1$ план определялся выражениями (1)–(3).

Пусть в момент времени $r = 1$ появляется возможность выпуска новой продукции. Новая модель уровня $h = 3$ может быть представлена выражениями

<u>OUT_1_1.TXT</u> $3 \leq N$ $2 \leq M$ $C, CX=1031.40$ 108.30 111.30 92.40 DN 0.00 0.00 0.00 DV 4.00 4.00 4.00 BN 0.00 0.00 BV 26.00 30.00 A 1.00 4.00 2.00 5.00 2.00 3.00 X 4.00 4.00 4.00 Xopt 2.00 4.00 4.00 B 26.00 30.00	<u>OUT_1_2.TXT</u> $2 \leq N$ $4 \leq M$ $C, CX=77746.00$ 1541.00 1256.00 DN 0.00 0.00 DV 26.00 30.00 BN 0.00 0.00 0.00 0.00 BV 172.00 142.00 190.00 164.00 A 2.00 4.00 2.00 3.00 5.00 2.00 4.00 2.00 X 26.00 30.00 Xopt 26.00 30.00 B 172.00 142.00 190.00 164.00
<u>OUT_2_1.TXT</u> $C, CX=2562.50$ 431.20 491.00 383.10 DN 1.00 0.00 0.00 DV 3.00 2.00 3.00 BN 15.00 18.00 BV 190.00 190.00 A 1.00 4.00 2.00 5.00 2.00 3.00 X 3.00 2.00 3.00 Xopt 1.00 2.00 3.00 B 15.00 18.00	<u>OUT_2_2.TXT</u> $C, CX=43630.40$ 1153.70 960.70 DN 15.00 18.00 DV 190.00 190.00 BN 0.00 0.00 0.00 0.00 BV 134.00 109.00 135.00 118.00 A 2.00 4.00 2.00 3.00 5.00 2.00 4.00 2.00 X 190.00 190.00 Xopt 17.00 25.00 B 134.00 109.00 135.00 118.00

$$\left| \begin{array}{c} BN \\ BN1 \end{array} \right| \leq \left\| \begin{array}{cc} A & A1 \\ 0 & A2 \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} X_h \\ X1 \end{array} \right\| \leq \left| \begin{array}{c} BV \\ BV1 \end{array} \right|$$

$$CX_n + C1X1 \rightarrow \max, \quad (5)$$

где подматрицы $A1$, $A2$, векторы $C1$, $X1$, $BV1$ относятся к новой продукции.

Достоинством данного расчета является привязка верхнего уровня системы к технологической цепочке (линии).

Тогда целесообразно переходить на выпуск новой продукции при выполнении условия

$$CX_n + C1X1 \geq CX.$$

Все предложенные варианты успешно проверены на числовых примерах.

Заключение. Исходный алгоритм дал возможность имитировать процесс планирования в технологической линии в статическом и динамическом режимах. Он позволил рассмотреть процедуру согласования экономических интересов в цепочке (горизонтальное согласование), смоделировать процедуру перехода на выпуск новой продукции с одновременной экономической оценкой целесообразности такого перехода. Предлагаемый алгоритм может быть применен для процедуры отладки адаптивной автоматизированной системы управления производством.

Возможности предложенного алгоритма не исчерпаны и требуют дополнительных исследований.

Литература

1. **Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д.** Теория адаптивного автоматизированного управления. СПб.: СПбГЭТУ, 2009. 256 с.
2. **Альсевич В. В., Габасов Р, Глушенков В. С.** Оптимизация линейных экономических моделей. Статические задачи. Мн.: БГУ, 2000. 210 с.

ИМИТАЦИЯ ДИНАМИКИ ЦЕН БИРЖЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ СЛУЧАЙНОГО БЛУЖДЕНИЯ ЦЕН С УСТОЙЧИВЫМИ ШАГАМИ

Д. Ю. Чукин, И. В. Трегуб (Москва)

Модели случайного блуждания для имитации динамики цен биржевых инструментов применяются достаточно давно. Стандартными предположениями в данном случае являются стационарность шагов модели и эффективность рынка, которая подразумевает независимость изменений цен, а значит, стремящееся к нормальному распределению суммы достаточно большого их количества. Однако на практике такие предположения часто оказываются несправедливыми, вследствие чего применение модели случайного блуждания дает неоднозначные результаты [1]. Реальное распределение цен имеет более высокий «пик» и тяжелые «хвосты».

Существенно повысить прогнозное качество модели можно, если предположить, что изменение цены имеет бесконечную дисперсию. В таком случае распределение суммы изменений цен будет стремиться к устойчивому распределению – семейству 4-параметрических распределений, членом которого, к слову, является и нормальное.

Единственной проблемой использования устойчивых распределений является отсутствие функции плотности распределения в явном виде, что делает применение методов имитационного моделирования наиболее приемлемым инструментом для описания динамики цен с устойчивыми изменениями.

Новизна работы заключается в использовании устойчивых распределений для имитации динамики цен биржевых инструментов и получении на основании этого абсолютно новых эмпирических результатов.

Имитационная модель случайного блуждания с устойчивыми шагами. Если фиксировать цену финансового инструмента через определенные равные моменты времени Δt и затем рассмотреть два момента времени t_0 и $t_1 = t_0 + k\Delta t$, то изменение цены за промежуток времени $[t_0, t_1]$ будет равно сумме изменений цены за каждый из интервалов $[t_0, t_0 + \Delta t], \dots, [t_0 + (k-1)\Delta t, t_1]$, то есть

$$\Delta P = P_{t_1} - P_{t_0} = \sum_{i=1}^k (P_{t_0 + i\Delta t} - P_{t_0 + (i-1)\Delta t}) = \sum_{i=1}^k \Delta P_{i\Delta t} . \quad (1)$$

Таким образом, изменение цены представляет собой случайное блуждание.

Случайная величина X распределена по устойчивому закону распределения $S(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ тогда и только тогда, когда для любого целого $n > 1$ существуют константы $c_n > 0$ и $d_n \in R$, такие что

$$X_1 + \dots + X_n = c_n X + d_n, \quad (2)$$

где $X_1, \dots, X_n \sim iidS(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$, а знак “=” означает равенство по распределению [2].

В явном виде существует только характеристическая функция, которая имеет вид [2]

$$\varphi(u) = E(e^{iuX}) = \begin{cases} e^{-\gamma |u|^\alpha (1 - i\beta \tan(\frac{\pi\alpha}{2}) \operatorname{sgn}(u)) + i\delta u}, & \alpha \neq 1; \\ e^{-\gamma |u| (1 - i\beta \operatorname{sgn}(u) \frac{2}{\pi} \log |u|) + i\delta u}, & \alpha = 1. \end{cases} \quad (3)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, – параметры устойчивого распределения. Параметр $\alpha \in (0, 2)$ называется показателем устойчивости распределения и отвечает за степень тяжести хвостов,

$\beta \in (-1, 1)$ называется показателем асимметрии и определяет наклон функции распределения, $\gamma > 0$ и $\delta \in R$ – показатели масштаба и сдвига, соответственно.

Имитационная модель строится путем генерации выборки из устойчивого распределения. Доказано [3], что случайная величина X , такая что

$$X = \begin{cases} \frac{S_{\alpha, \beta} \sin(\alpha(V + B_{\alpha, \beta}))}{\cos(V)^\alpha} \left(\frac{\cos(V - \alpha(V + B_{\alpha, \beta}))}{W} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}, & \alpha \neq 1; \\ \frac{2}{\pi} \left(\left(\frac{\pi}{2} + \beta V \right) \tan(V) - \beta \ln \left(\frac{W \cos(V)}{\frac{\pi}{2} + \beta V} \right) \right), & \alpha = 1, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$B_{\alpha, \beta} = \frac{\arctan\left(\beta \tan\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)\right)}{\alpha}, \quad S_{\alpha, \beta} = \left(1 + \beta^2 \tan^2\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)\right)^{\frac{1}{2\alpha}},$$

$$V \sim U\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), \quad W \sim \text{Exp}(1),$$

распределена по устойчивому закону с параметрами $\alpha, \beta, 1, 0$.

Тогда можно получить случайную выборку с любым допустимым значением параметров:

$$Y = \begin{cases} \gamma X + \delta, & \alpha \neq 1; \\ \gamma X + \frac{2}{\pi} \beta \gamma \ln(\gamma) + \delta, & \alpha = 1. \end{cases} \quad (5)$$

Проверка адекватности имитационной модели. Случайное блуждание является чисто стохастической моделью, поэтому на практике ее разумно применять для получения интервальных прогнозов. В силу данного факта модель использовалась для оценки процентного обеспечения под биржевой инструмент, покрывающего возможное будущее падение цены с вероятностью 0,99. Для проверки адекватности имитационной модели использовались следующие данные (табл. 1):

Таблица 1

Тип биржевого инструмента	Название финансового инструмента	Обучающая выборка	Контролирующая выборка	Источник
Акция	GMKN, SNGS, LKOH	2000–008	2009–2010	www.finam.ru
Облигация	US Treasury Bonds 5 & 30			www.finance.yahoo.com
Валюта	EUR/GBP, EUR/JPY, EUR/USD	2001–008		www.finam.ru

Алгоритм проверки адекватности имитационной модели реализован в MATLAB:
1. Выбирается определенный временной интервал.

2. По выборке оцениваются параметры устойчивого и нормального распределений для дневных колебаний цен.

3. Проводится имитационный эксперимент:

а) генерируются выборки из нормального и устойчивого законов распределения объемом 100 000 ед. каждая;

б) вычисляются эмпирические квантили обоих распределений для уровня значимости $\alpha = ,01$;

в) полученные квантили сравниваются с реальным изменением цены за период.

4. Обучающая выборка увеличивается на одно наблюдение, параметры переоцениваются, и происходит возврат к пункту 2.

Параметры оценивались по дневным пикам по обучающей выборке (табл. 2). Оценка осуществлялась с использованием регрессионного метода Koutrouvelis [4].

Таблица 2

Тип инструмента	α	β	γ	δ
GMKN	1,0863	-0,065	27,9161	-9,3454
SNGS	1,4361	0,0155	0,2714	0,0083
LKOH	1,1783	-0,0435	10,1449	-0,5034
EUR/GBP	1,5230	0,1619	0,0015	0,0002
EUR/JPY	1,3872	-0,2168	0,3676	-0,0361
EUR/USD	1,3499	0,0024	0,0030	0,0003
USTB 5	1,7849	0,1729	0,0425	-0,0016
USTB 30	1,8639	0,3240	0,0334	-0,001

Полученные оценки наиболее устойчивы, если проводить переоценку параметров путем увеличения выборки на каждом шаге.

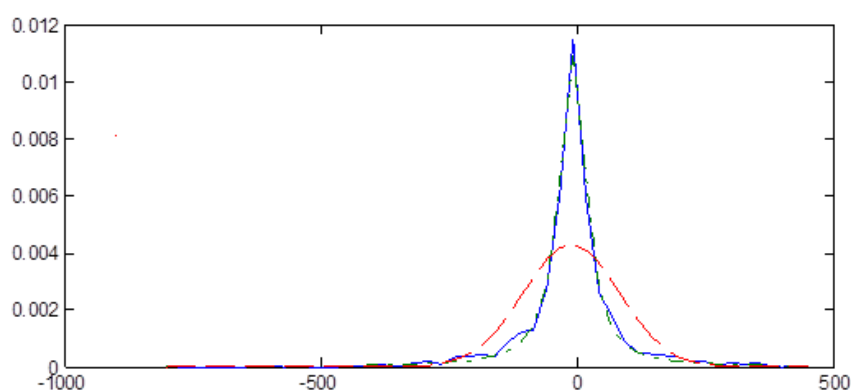


Рис. 3. Эмпирическая и теоретические функции плотности распределения

На рис. 1. представлена аппроксимация эмпирической функции плотности распределения дневных изменений цен GMKN устойчивым и нормальным законами. Штрихпунктирная линия соответствует теоретической плотности распределения устойчивого закона с оцененными параметрами, пунктирная линия – теоретической плотности распределения нормального закона с оцененными параметрами, сплошная линия – эмпирической плотности распределения. Из приведенного рисунка видно, что устойчивое распределение намного качественнее описывает дневное изменение цен акций по сравнению с традиционно применяемым нормальным распределением.

Имитация динамики изменения цен GMKN на основе разработанной модели для различных временных интервалов на контролирующей выборке представлена на рис. 2, 3. Точками на рисунках представлены эмпирические изменения цены за рассматриваемый интервал. Нижняя осциллирующая линия – квантиль устойчивого распределения для уровня $\alpha = 0,01$. Сплошная линия в центре рисунка соответствует 0,01 квантилю нормального распределения.

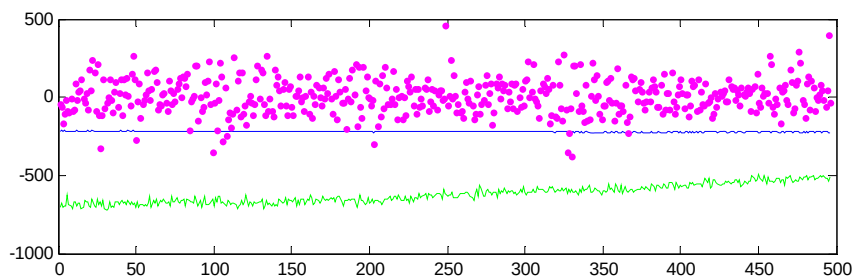


Рис. 4. Дневной интервал для GMKN

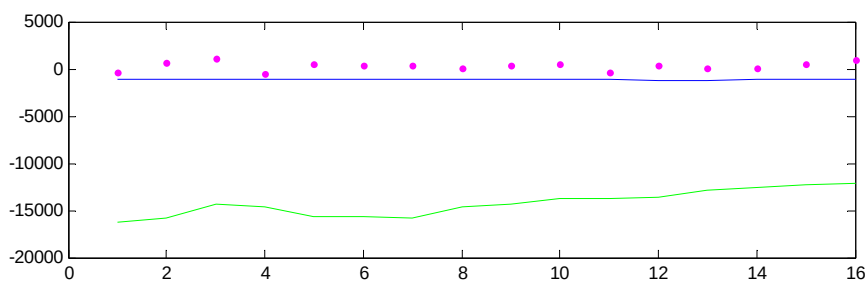


Рис. 3. Месячный интервал для GMKN

Из приведенных графиков видно, что для месячных данных реальные значения не опускаются ниже линии квантили как для устойчивого, так и для нормального распределения. Таким образом, для больших интервалов прогнозирования как устойчивые, так и нормальные распределения очень хорошо оценивают масштабы возможного падения цен. Однако в случае месячного интервала размеры резервов могут быть рассчитаны и без использования имитационной модели случайного блуждания, так как они составляют чуть менее чем 100% стоимости самого финансового инструмента. Поэтому далее рассматривались только дневные интервалы времени.

Размер процентного обеспечения под каждую акцию (рис. 4) в начале 2009 года, согласно имитационной модели, был порядка 60%, однако к концу 2010 года снизился в среднем до 10–15%, что является приемлемым результатом для использования на практике.

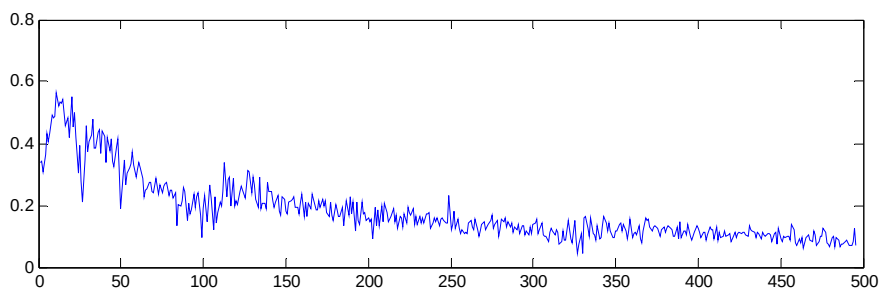


Рис. 4. Обеспечение акций GMKN в процентах от цены

Результаты по всем инструментам сгруппированы в табл.3

Таблица 3

Тип инструмента	Эмпирическая вероятность падения цены для нормально- го распределения	Эмпирическая вероятность падения цены для устойчиво- го распределения
GMKN	0,0202	0
SNGS	0,0121	0,002
LKOH	0,0202	0
EUR/GBP	0,0508	0,0261
EUR/JPY	0,0398	0,0027
EUR/USD	0,0413	0
USTB 5	0,008	0,008
USTB 30	0,0339	0,0359

Анализ результатов показывает, что для всех рассмотренных инструментов вероятности падения цен достаточно малы. Величина дневного резерва составляет в среднем не более 30% от стоимости финансового инструмента. Кроме того, резерв, рассчитанный с использованием устойчивого распределения, при тестировании на всех трех типах финансовых инструментов показал лучшие результаты, чем нормальное распределение. Устойчивое распределение переоценило вероятность падения в случае с двумя финансовыми инструментами из изучаемых восьми, в то время как нормальное в семи из восьми случаев дало неверный результат. Если учесть тот факт, что нормальное распределение есть устойчивое с параметрами $\alpha = 2, \beta = 0, \gamma, \delta$, то можно объяснить недооценку вероятности падения цены в двух случаях с устойчивым распределением его близостью к нормальному.

Выводы

1. Для больших интервалов времени прогнозирования имитационная модель в одинаковой степени дает хорошие результаты, как с нормальным, так и с устойчивым распределением, однако ее применение нецелесообразно, поскольку оценки возможного падения цены могут быть получены аналитически.

2. Для коротких временных интервалов имитационную модель рекомендуется использовать при малом значении параметра α , когда устойчивое распределение далеко от нормального.

3. При соблюдении рекомендации имитационная модель подходит для оценки резерва для любого типа биржевых инструментов: акций, облигаций, валюты.

Литература

1. **Трегуб И. В.** Имитационное моделирование. М.: изд-во Финакадемии, 2007.
2. **Nolan J.** Stable Distributions, Models for Heavy Tailed Data, Birkhauser, 2010.
3. **Weron R.** On the Chambers-Mallows-Stuck Method for Simulating Skewed Stable Random Variables, Statistics & Probability Letters 28(1996). P. 165–171.
4. **Weron R.** Performance of the Estimators of Stable Law Parameters, HSC, Research Report HSC/95/1.

**ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ
ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ АТАК
И МЕХАНИЗМОВ ЗАЩИТЫ ОТ НИХ*****А. В. Шоров, И. В. Котенко (Санкт-Петербург)**

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению количества и мощности компьютерных атак на инфраструктуру вычислительных сетей. Постоянный рост распределенных атак типа «отказ в обслуживании» и вирусных эпидемий, провоцируемых сетевыми червями, свидетельствует о необходимости исследования новых методов защиты с принципиально новой архитектурой. Такое исследование невозможно проводить на реальных компьютерных сетях в силу возможных последствий имитации атак для информационно-телекоммуникационных систем.

Таким образом, одной из важнейших задач в области защиты информации является исследовательское моделирование инфраструктурных атак и механизмов защиты от них с целью разработки и тестирования эффективных методов противодействия им. Имитационное моделирование предоставляет гибкий механизм исследования таких сложных динамических систем как системы защиты информации компьютерных сетей, позволяя оперировать с различными наборами параметров и сценариев атак и защиты.

Одним из подходов к спецификации исследуемых процессов и систем является теоретико-множественное представление. В настоящей работе предлагается теоретико-множественный подход для описания моделей инфраструктурных атак на компьютерные сети и механизмов защиты от них и проводится формализация инфраструктурных атак, механизмы защиты от них, а также среды их взаимодействия (компьютерной сети). Также рассматриваются среда имитационного моделирования, в которой реализуются представленные формальные модели, и эксперименты, проводимые с использованием данной среды. В виду ограниченности объема данной работы все модели специфицируются только на верхнем уровне представления.

Модель компьютерной сети. Представим верхний уровень модели анализируемой компьютерной сети в виде кортежа $N = \langle T, TP, TR \rangle$, где T – тип топологии; TP – топология сети; TR – трафик в сети.

Тип топологии сети может быть задан как $T \subseteq \langle Ln, Bs, St, Rn, Tr, Mh, Hbr \rangle$, специфицируя следующие типы топологий: Ln – линия, Bs – шина, St – звезда, Rn – кольцо, Tr – дерево, Mh – решетка, Hbr – гибридная.

Топология сети $TP = \langle H, L \rangle$ включает в себя: H – узлы (хосты) вычислительной сети, L – связи между узлами вычислительной сети.

Трафик TR определим в виде $TR = \cup p_i^P$, где p_i – пакеты трафика, P – протокол, который используется для передачи пакета p . $p_i = \{Par_i\}$, где Par – параметры пакета в соответствии с используемым протоколом.

Например, для пакетов, инкапсулированных в соответствии с протоколом IP, $p_i^{IP} = \{srcAddr, dstAddr, AP\}$, а для пакетов на основе протокола TCP – $p_i^{TCP} = \{srcPort, destPort, AP\}$, где $srcAddr$, $dstAddr$, $srcPort$, $destPort$ – основные параметры протоколов IP/TCP (адреса и порты источника и назначения), AP – дополнитель-

* Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-01-00826-а), программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект 3.2), государственного контракта 11.519.11.4008 и при частичной финансовой поддержке, осуществляемой в рамках проектов Евросоюза SecFutur и MASSIF.

ные атрибуты пакета, включая полезную нагрузку. Множество пакетов p_i^P генерируется множеством приложений PO .

Модели инфраструктурных атак. Множество моделей инфраструктурных атак на верхнем уровне представляются в следующем виде: $A = \langle TA, CA \rangle$, где TA – тип инфраструктурной атаки, CA – параметры реализации атаки.

Тип инфраструктурной атаки может задаваться в следующем виде: $TA = \langle Wrm_{n,m}, DDoS_{n,m}, AoR_{n,m}, AoDNS_{n,m} \rangle$, где $Wrm_{n,m}$ – распространение сетевого червя, $DDoS_{n,m}$ – распределенная атака типа «отказ в обслуживании», $AoR_{n,m}$ – атаки на маршрутизаторы, $AoDNS_{n,m}$ – атаки на DNS-сервера; переменная n служит для идентификации типа атаки на верхнем уровне представления модели (например, название типа атаки), m определяет параметры заданного механизма атаки (например, источник атаки).

Опишем модели сетевого червя и распределенной атаки типа «отказ в обслуживании», как наиболее часто выполняемых инфраструктурных атак.

Определим сетевого червя с помощью теоретико-множественных моделей:

$Wrm_{n,m} = \langle I, M_{ct}, f, Sppt, Dppt, M_{st}, P_{sc}, PS, M_{spoof} \rangle$, где I – идентификатор червя; M_{ct} – тип соединения, соединения могут быть на основе протокола TCP или на основе протокола UDP; f – частота генерации пакетов, число пакетов (соединений), генерируемых в секунду; $Sppt$ – сетевой порт, с которого отсылаются пакеты; $Dppt$ – сетевой порт, на который отсылаются пакеты; M_{st} – методика сканирования; P_{sc} – вероятность установления успешного TCP-соединения. Данный параметр имеет значение в случае распространения сетевого червя по протоколу TCP; в случае работы по UDP параметр помечается как недоступный; PS – размер пакета, передаваемого по сети; M_{spoof} – методики подмены сетевого адреса и порта.

Далее опишем модель DDoS-атаки:

$DDoS_{n,m} = \langle I, TDD, NP, f, Sppt, Dad, Dppt, PS, M_{spoof} \rangle$, где I – идентификатор атаки; TDD – тип DDoS-атаки; NP – количество пакетов, которое необходимо отправить на атакуемый узел; f – число пакетов, генерируемых в секунду, параметр f и NP определяют длительность атаки $T_{Attack} = NP / f$; $Sppt$ – сетевой порт, с которого отсылаются пакеты; Dad – адрес назначения (IP-адрес компьютера-жертвы); $Dppt$ – сетевой порт, на который отсылаются пакеты; PS – размер пакета; M_{spoof} – методики подмены сетевого адреса и порта. При выполнении DDoS-атак часто используются техники подмены IP-адреса отправителя. Более того, некоторые атаки основаны на подмене данного адреса.

Модели механизмов защиты. Множество базовых механизмов защиты представляются в виде $D = \langle TD, CD \rangle$, где TD – тип базового механизма защиты; CD – параметры механизма защиты, $CD \in \{n\}$.

Тип механизма защиты от инфраструктурных атак: $TD = \langle DWrm_{n,m}, DfDDoS_{n,m}, DAoR_{n,m}, DAoDNS_{n,m} \rangle$, где $DWrm_{n,m}$ – механизмы защиты от распространения сетевого червя; $DfDDoS_{n,m}$ – механизмы защиты от распределенных атак типа «отказ в обслуживании»; $DAoR_{n,m}$ – механизмы защиты от атак на маршрутизаторы; $DAoDNS_{n,m}$ – механизмы защиты от атак на DNS-сервера, переменная n служит для идентификации типа механизма защиты на верхнем уровне представления модели,

m определяет параметры заданного механизма защиты (например, место расположения механизма защиты в сети).

Рассмотрим теоретико-множественные модели базовых механизмов защиты от распространения компьютерного червя:

$DWrm_{n,m} \subseteq \langle DWrm' \rangle$, где $DWrm'$ – множество подходов для защиты компьютерной сети от распространения сетевого червя.

$DWrm' = \langle TW, CW \rangle$, где TW – тип базового механизма защиты, CW – параметры механизма защиты.

В качестве базовых компонентов механизмов защиты от распространения червя можно выделить такие подходы, как дросселирование вирусов, анализ неудачных соединений и т.д. Тогда представим $DWrm_{n,m}$ как:

$DWrm_{n,m} = \{VT, FC, TRW, CB, \dots\}$, где VT – механизм защиты на основе подхода «дросселирование вирусов» (Virus Throttling); FC – механизм защиты на основе подхода «анализ неудачных соединений» (Failed Connection); TRW – механизм защиты на основе подхода «случайного порогового прохождение» (Threshold Random Walk); CB – механизм ограничения интенсивности соединений на основе кредитов доверия (Credit Base-based Rate Limiting).

Представим модели механизмов защиты от DDoS-атак как:

$DfDDoS_{n,m} = \{IEF, RBF, SV, HCF, SIM, SNd, MTP, SpA, KmT,$

$AcIn, HsBs, PMs, HIPF, SnK, SIPs, SOS, DWD, \dots\}$,

где IEF – фильтрация входящего и исходящего трафика (Ingress/Edgress Filtering); RBF – фильтрация пакетов на маршрутизаторах (Router-Based Packet Filtering); SV – принудительная проверка адреса отправителя (Source Address Validity Enforcement, SAVE); HCF – фильтрация по количеству хопов (Hop-count filtering); SIM – мониторинг исходных IP адресов (Source IP Monitoring, SIM); SNd – обнаружение SYN-пакетов (SYN detection); MTP – MULTOPS; SpA – спектральный анализ (Spectral analysis); KmT – тест Колмогорова; $AcIn$ – активное взаимодействие (Active Interaction); $HsBs$ – трассировка на основе хешей (Hash-based traceback); PMs – вероятностные схемы маркировки пакетов (Probabilistic packet marking schemes); $HIPF$ – фильтрация на основе истории полученных IP адресов (History-based IP Filtering); SnK – сброс полуоткрытых соединений (SYNkill); $SIPs$ – Selective Pushback; SOS – использование оверлейных сетей (Secure overlay service); DWD – обнаружение аномалий на основе подхода D-WARD.

Подход «нервная система сети». Подход «нервная система сети» служит для объединения базовых подходов по защите сети от инфраструктурных атак и призван улучшить их эффективность. Подход базируется на распределенном механизме сбора и обработки информации для обнаружения атак и противодействия им. В каждой автономной системе имеется специальный сервер, который выполняет функции сбора и обработки информации, координации подключенных к нему узлов и обмена данными об атаках с серверами в других сетях. Узлы выполняют функции обнаружения и блокировки атак, а также передачи информации об обнаруженных атаках на сервер к которому они подключены.

Используем теоретико-множественное представление для определения модели «нервной системы сети». Представим «нервную систему сети» в виде $NN = \langle NS, NH \rangle$,

где NS – сервера «нервной системы сети»; NH – узлы нервной системы сети, например маршрутизаторы.

Сервер «нервной сети» содержит в себе следующие модули: $NS = \langle IM, PM, EM, CM, DM, sDB \rangle$, где IM – блок обмена данными с узлами «нервной сети»; EM – блок обмена данными между серверами «нервной системы сети»; DM – блок принятия решений и определения ответной реакции; sDB – база данных.

Рассмотрим более подробно блок принятия решений и определения ответной реакции: $DM = \langle PM, CM, dEE, dBE, dAD, F_{pm}, F_{cm}, F_{bkTr} \rangle$, где PM – модуль приоритезации полученных данных; CM – модуль корреляции полученных данных между собой; dEE – модуль обмена данными с другими серверами нервной системы сети и узлами локальной нервной системы сети; dBE – модуль обмена информацией с базой данных сервера; dAD – модуль принятия решений; F_{pm} – функция, описывающая работу модуля приоритезации; F_{cm} – функция, задающая работу модуля корреляции; F_{bkTr} – функция, определяющая функционирование модуля блокировки.

Представим узел «нервной сети» в следующем виде:

$NH = \langle AG, TR, NT, HD \rangle$, где AG – модуль сбора информации с сенсоров; TR – модуль обмена данными с сервером «нервной системы сети»; NT – модуль обмена данными между узлами «нервной системы сети»; HD – модуль, реализующий обработку трафика.

Подробнее остановимся на модуле обработки трафика: $HD = \langle RP, CP, VD, nDB, RA \rangle$, где RP – блок перенаправления потоков, выполняющий разделение трафика на потоки согласно адресу отправителя и адресу получателя; CP – блок классификации пакетов определяет протокол и тип пакеты (запрос на соединение, пакет с данными и т.п.); VD – блок анализа и противодействия; nDB – база данных узла; RA – блок сдерживания атак.

Для определения связей между компонентами «нервной системы сети» представим их в виде: $DE = \{Nd, P\}$, где Nd – взаимодействующие субъекты, P – тип связи.

Связь между серверами «нервной системы сети» определяется в виде: $DE_{S,S} = \{(S_{AS1}, S_{AS2}), IFSec3\}$, где S_{AS1} и S_{AS2} – сервера «нервной сети», между которыми установлена связь, $IFSec3$ – тип протокола, посредством которого осуществляется взаимодействие. Сервера обмениваются локальными «деревьями» или «глобальными деревьями» (задающими трассы вредоносной активности), необходимыми для построения маршрута прохождения вредоносного трафика от атакующего к атакуемому.

Связь между сервером и подчиненными ему узлами представляется в виде: $DE_{S,N} = \{(S_{AS1}, N_{AS1}^{\{1..n\}}), IFSec2\}$, где S_{AS1} и $N_{AS1}^{\{1..n\}}$ – сервера и узлы, между которыми установлена связь, $IFSec2$ – тип протокола, посредством которого осуществляется взаимодействие. Узлы передают данные серверам о детектированных атаках и получают команду на блокировку узлов.

Связь между узлами нервной сети внутри одной подсети представляется в виде: $DE_{N,N} = \{(N_{AS1}^1, N_{AS1}^n), IFSec1\}$, где N_{AS1}^1 и N_{AS1}^n – узлы, между которыми установлена связь, $IFSec1$ – тип протокола, посредством которого осуществляется взаимодействие. Узлы нервной сети обмениваются данными об обнаруженных аномалиях, для детектирования вредоносных потоков.

Среда имитационного моделирования и эксперименты. Для реализации предлагаемого подхода, в качестве основного инструмента исследования, разрабатывается инструментальная среда для моделирования сетевых процессов в области инфор-

мационной безопасности. Архитектура среды задается в виде иерархии различных модулей и включает в себя систему моделирования дискретных событий, а также ряд компонентов, которые реализуют сущности более высокого уровня моделирования.

Нижний уровень среды моделирования *MS*, включает в себя планировщик *Sc*, посредством которого событиям *Ev* задается время вызова *T*. События оперируют сущностями *En*, которые обеспечивают взаимодействие множества элементов верхних уровней. Промежуточные уровни реализуют модели, характеризующие работу узлов в сети Интернет, например сетевые протоколы, типовые узлы и приложения. С их помощью осуществляется функционирование слоев более высокого уровня, определяющих механизмы атаки и защиты.

С использованием системы моделирования OMNeT++, библиотек INET Framework, ReaSE и собственных программных компонент предлагаемая архитектура была реализована для моделирования инфраструктурных атак и механизмов защиты от них.

Для оценки реализованных моделей инфраструктурных атак и механизмов защиты были проведены эксперименты. Проводились эксперименты по реализации таких атак, как распространение компьютерного червя и распределенная атака типа «отказ в обслуживании». В качестве механизмов защиты использовались модели на основе подходов Failed Connection, Virus Throttling, HCF, SIM, SAVE, SYN detection, а также подход «нервная система сети». Модели механизмов защиты имеют настраиваемые параметры, позволяющие производить поиск наиболее эффективных конфигураций.

Стратегии распространения сетевого червя оценивалось по проценту зараженных уязвимых компьютеров от общего количества уязвимых компьютеров. Выполнение атаки типа «распределенный отказ в обслуживании» оценивалось по количеству пакетов, приходящих на целевой узел в секунду. Качество работы механизмов защиты определялось по числу ошибок первого и второго рода, т.е. количеству ложных срабатываний (FP) и количеству пропущенных пакетов из атакующего трафика (FN).

Эксперименты показали, что в одинаковых условиях, комбинация механизма защиты «нервная система сети» и базовых механизмов защиты дает меньшее количество ложных срабатываний, позволяет серьезно снизить количество зараженных компьютеров в случае распространения сетевого червя и более эффективную фильтрацию атакующего трафика в случае выполнения атаки типа «распределенный отказ в обслуживании».

Заключение. На основе представленного теоретико-множественного подхода построены имитационные модели инфраструктурных атак на компьютерные сети и механизмов защиты от них, в том числе имитационная модель «нервной системы сети» и модель компьютерной сети, выполняющей роль среды взаимодействия стороны атаки и защиты. С помощью системы моделирования OMNeT++, библиотек INET Framework и ReaSE представленные модели использовались для создания среды имитационного моделирования атак на компьютерные сети и механизмов защиты от них. С помощью разработанной среды имитационного моделирования были проведены эксперименты по распространению сетевого червя, выполнения атак типа «распределенный отказ в обслуживании» и механизмов противодействия им.

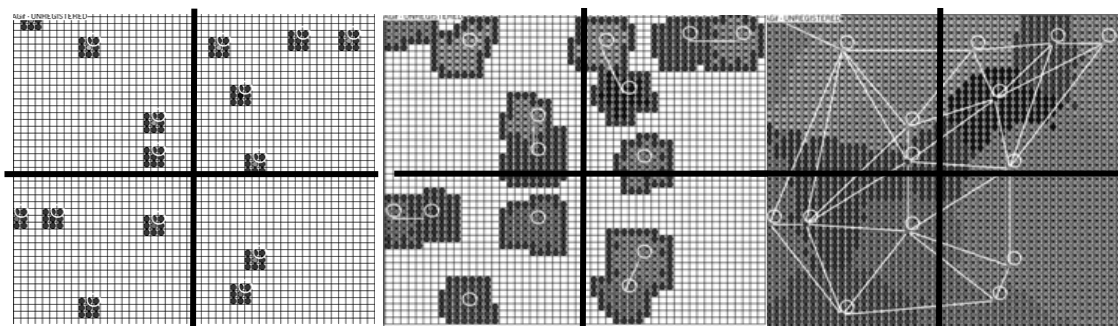
**ГЕНЕРАЦИЯ ГРАФОВ СОСЕДСТВА В СРЕДЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО
АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ REPASTHPC****Е. Б. Юдин, Е. Р. Васильев (Омск)**

Архитектура массивно-параллельных систем (МРР), преобладающая в классе суперкомпьютеров, устанавливает, что каждому процессору обеспечивается доступ лишь к собственной локальной памяти, а если в программе, запущенной на одном из процессоров, нужно получить данные, расположенные в памяти другого процессора, то задействуется механизм передачи сообщений. Эта архитектура накладывает ряд ограничений. В частности, необходимо учитывать топологию системы и рационально распределять данные между процессорами, использовать специальные средства для межпроцессорной передачи сообщений, а в случае реализации системы поддержки имитационного моделирования, необходимо также специальным образом обеспечить синхронизацию моделируемых процессов. Для решения перечисленных задач существуют модели, методы и средства распределенного имитационного моделирования, в том числе SLX (Henriksen, Wolverine Corp., США), Мера (В. В. Окольников и др., Россия), Диана (В. В. Гусев и др., Украина) и другие. Причем различные средства распределенного моделирования ориентируются на различный класс задач. В представленной работе для реализации генератора случайного «графа соседства» на вычислительном кластере с МРР-архитектурой используется среда распределенного моделирования RepastHPC [1] (Collier, Аргоннская лаборатория, США). Система RepastHPC позволяет эффективно реализовать моделирование клеточных автоматов и процессы на сетях.

Генерация графа соседства

Генерация графа соседства начинается со случайного разбрасывания «центров» в ячейки грида (грид представляет собой ячеистую структуру, задаваемую на основе квадратной решетки). Центры имеют «силу», которая определяет для «центров» вероятность захвата центром соседних (еще не захваченных) ячеек. Захваченная центром ячейка в дальнейшем действует от имени центра, выполняя захват соседних ячеек. В ситуации, когда различные центры претендуют на захват одной ячейки, захвативший ячейку центр определяется путем стохастического голосования. Каждая из захваченных центром ячеек голосует от имени центра, которым захвачена. Процесс случайных захватов ячеек заканчивается формированием карты областей.

Процесс генерации графа соседства, реализованный в RepastHPC, представлен на рис. 1, 2. Грид разбивается на локальные подгриды, расположенные в памяти различных процессоров. Взаимодействие между подгридами осуществляется через буферные ячейки между подгридами (рис. 2).

**Рис. 1. Генерация графа соседства:**

начальная конфигурация; промежуточная конфигурация и конечное состояние

Синхронизация содержимого ячеек осуществляется после каждого шага захвата центрами соседних ячеек.

Информация о графе (вершины графа ассоциируются с центрами на гриде) хранится, как и любые данные в MPP-архитектуре, локально в каждом процессе. А поскольку в процессе генерации необходимо иметь информацию об общей структуре графа, при инициализации модели (после разброса центров графа соседства) для всех вершин, которые не являются локальными в текущем процессе, создаются копии. Таким образом, все процессы хранят образ единого графа, а добавляемые в одном из процессов ребра, добавляются в другие процессы в результате синхронизации.

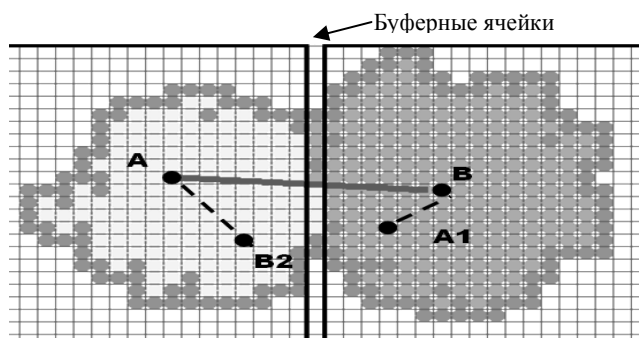


Рис. 2. Синхронизация ребер

(При создании между вершинами процессоров P1 и P2 ребра (A-B) сначала ребро создается локально (A-B2) или (B-A1) и в дальнейшем должно синхронизироваться для всех процессоров)

Предложенная реализация с использованием среды для распределенного моделирования RepastHPC позволяет генерировать графы соседства необходимого размера для эффективного исследования статистическими методами. Как можно видеть на рис. 3, с увеличением задействованных процессоров достигается существенное уменьшение времени генерации (генерируется граф соседства с центрами одной силы, разбросанных по гриду 1 млн. с вероятностью 0,001 в ячейке).

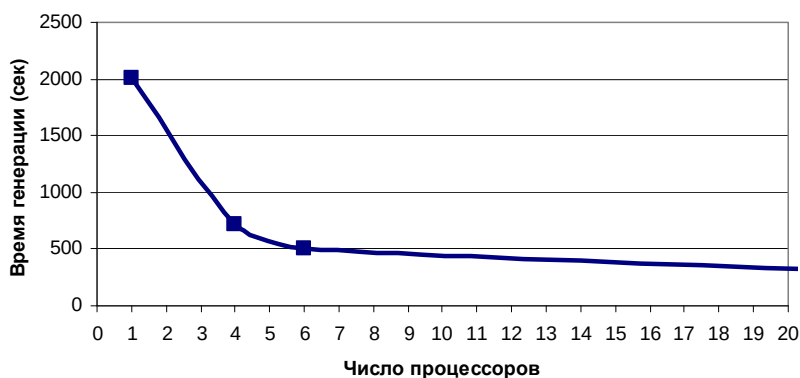


Рис. 3. Зависимость времени генерации графа от числа процессоров вычислительного кластера Омского государственного технического университета

Свойства графа соседства

Рассмотрим устойчивость графов соседства при случайных удалениях узлов/ребер графа. Расчет устойчивости выполним по аналогии с расчетами устойчивости для решетчатых моделей. Так, при исследовании решеток в теории перколяции рассматривается так называемые задача связей и задача узлов. В задаче связей ищется ответ на вопрос, который на языке исследования устойчивости, следует сформулировать так: какую долю связей нужно удалить (моделируя «отказы» связей), чтобы решетка

потеряла устойчивость? В задаче узлов случайно удаляют узлы (соответственно удаляются все инцидентные узлу связи). Устойчивость решетки интерпретируется через сохранение так называемого стягивающего кластера (в таком случае остаются широкие возможности переноса выполняемых функций с одного узла на другой). Кластером в теории перколяции называется цепочка связанных между собой узлов. При значениях вероятности p удалений узлов/связей больше порогового значения p_c в бесконечной решетке можно найти кластеры только конечного размера. При значениях меньше p_c образуется стягивающий кластер, в случае бесконечной решетки, связывающий бесконечное количество узлов. Устойчивость характеризуется, таким образом, вероятностью P принадлежности к «стягивающему кластеру» случайно выбранного узла при заданной вероятности удалений узлов/связей. В теории перколяции устанавливается, что зависимость $P(p)$ носит критический, переключательный характер для бесконечных решеток. Для конечных решеток зависимость $P(p)$ изменяется плавно, не в критической точке p_c , а в критической области значений p (рис. 4).

Типичные формы и размеры контактных кластеров при различных значениях вероятности удаления p связей в решетке изображены на рис. 5.

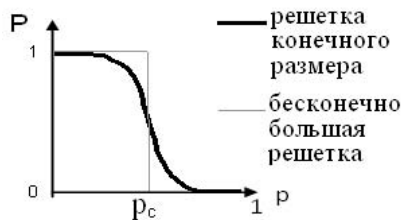


Рис. 4. Вероятность гигантского (стягивающего) кластера

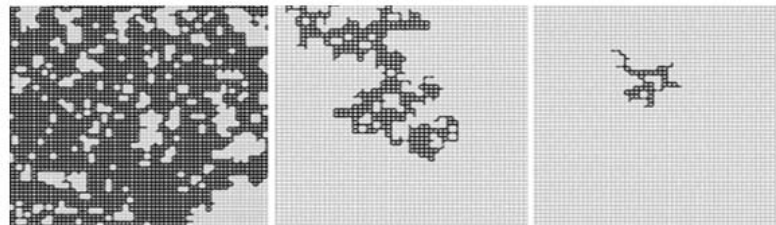


Рис. 5. Максимальные контактные кластеры в решетке при разных вероятностях удаления ребер p (остальные кластеры не показаны)

Устойчивость графов соседства при случайных удалениях вершин/ребер может быть также исследована с позиций теории перколяции (рис. 6). На рис. 7 изображены типичные размеры максимальных кластеров при разных вероятностях удаления p ребер графа соседства.

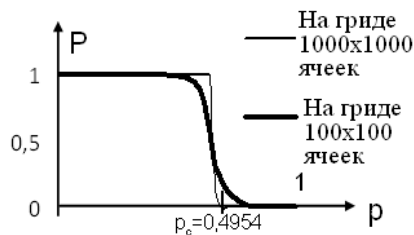


Рис. 6. Оценка порога перколяции в задаче ребер для графов соседства

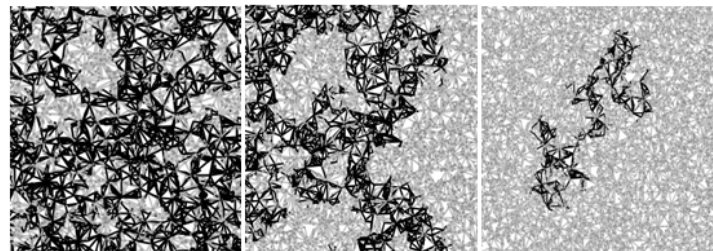


Рис. 7. Максимальные контактные кластеры в при разных вероятностях удаления ребер p (остальные кластеры не показаны)

Законы перколяции, установленные для решеток, также непосредственно применимы и к графам соседства. В частности, среднее квадратичное отклонение σ , характеризующее ширину критической области вероятности удаления ребер, уменьшается (рис. 8) с ростом числа вершин N по степенному закону: $\sigma(N) = C \cdot N^{-1/(v \cdot d)}$, где $d = 2$ — размерность пространства, C — коэффициент, зависящий от семейства графов, v — одна из констант теории решеточной перколяции. Подбор v и C по зависимостям $\sigma(N)$, полученных на основе статистического моделирования удаления ребер в графах соседства (метод Монте-Карло), подтверждает применимость константы $v = 4/3$, установленной [2] для плоских решеток.

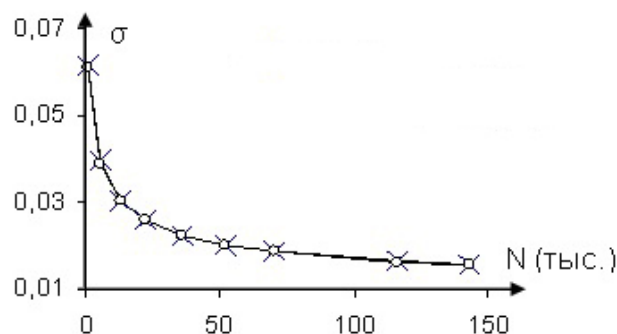


Рис. 8. Теоретическая и эмпирическая зависимости σ от N в графе соседства:

—×— теоретическая $\sigma(N)$; —○— эмпирическая $\sigma(N)$

В работе [3] обсуждается принадлежность графа соседства к классу статистически однородных графов, а также дополнительно рассматриваются свойства на пороге перколяции. Таким образом, графы соседства расширяют теорию перколяции новыми структурами. В работе [4] графы соседства применяются в качестве среды взаимодействия популяций «хищников–жертв», а также среды распространения вируса.

Заключение

Широкое применение клеточных автоматов нашли при моделировании транспортных потоков, лесных пожаров, процессов диффузии, в целом клеточные используются для моделирования пространственно-распределенных систем, включая квантовые [5, 6]. В рассмотренной имитационной программе, разработанной для выполнения в многопроцессорной среде, клеточные автоматы используются для генерации пространственно-распределенного случайного графа – графа соседства. Граф соседства моделирует структуру, изоморфную некоторой плоской или пространственной нерегулярной упаковке, такая структура может быть моделью некоторых физико-химических микроструктур (рис. 9). В статье отмечается существенный выигрыш в производительности при генерации графа соседства на MPP архитектуре с использованием средств моделирования RepastHPC.

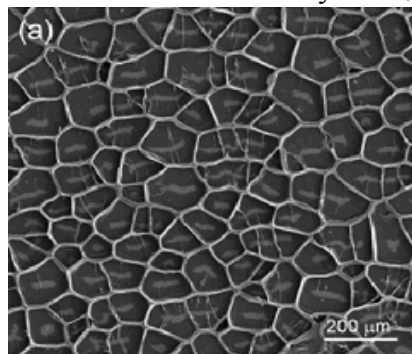


Рис. 9. Структура, образуемая при высыхании массива углеродных нанотрубок

Литература

1. Collier N. T. and North M. J. Repast HPC: A Platform for Large-scale Agent-based Modeling // Dubitzky K. Kurowski and B. Schott, eds., Large-Scale Computing Techniques for Complex System Simulations, Wiley (In Press), 2011.
2. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. М.: УРСС, 2002. 112 с.
3. Задорожный В. Н., Юдин Е. Б. Статистически однородные случайные графы: определение, генерация, применение // Омский научный вестник. 2009. №3. С. 7–13.
4. Юдин Е. Б. Исследование распространения инфекции на графах соседства // Информационные технологии и автоматизация управления. Матер. межвуз. науч.-практ. конф., 2010. С. 107–109.
5. Porad W. Quantum-Dot Cellular Automata: Emerging Nanoelectronic Device Technologies // Proc. of Nano Engineering World Forum. Boston, 2003.
6. Bandman O. Simulation Spatial Dynamics by Probabilistic Cellular Automata // 5th International Conference, Geneva, 2002. V. 2493 (Ed. B.Chopard). P. 10–19.

ЕДИНАЯ ОБЛАЧНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ СРЕДА GPSS CLOUD**В. В. Александров (Казань)****Введение**

Имитационные исследования являются сложным по сути и длительным по времени процессом, который требует множества вычислений, в том числе распределенных. Выделяют несколько этапов имитационных исследований: постановка задачи, сбор и обработка данных, разработка и корректировка модели, моделирование, накопление результатов, планирование экспериментов, анализ результатов, документирование и хранение результатов. Для проведения таких исследований создаются различные системы автоматизации имитационных исследований (САИИ). С точки зрения вычислительной мощности САИИ можно классифицировать следующим образом: автономные САИИ (отдельная виртуальная или физическая машина), сетевые САИИ в LAN (однородные распределенные вычисления), распределенные САИИ в WAN/Internet (гетерогенные вычисления, включая GRID-системы), высокопроизводительные САИИ (суперкомпьютеры и вычислительные кластеры), гибридные САИИ (распределенные GRID-вычисления и суперкомпьютеры). Необходимость организации распределенных вычислений в САИИ обуславливается высокой сложностью моделей и большим объемом исходных данных.

Предлагаемый облачный подход к построению САИИ позволяет существенно упростить и унифицировать проведение имитационных исследований для конечных пользователей, образуя единую имитационную среду (ЕИС). ЕИС абстрагирует пользователя от особенностей выполнения имитационных исследований и является инвариантной по отношению к оконечному аппаратному и программному обеспечению. Отличительным достоинством ЕИС являются минимальные требования к пользовательскому оборудованию – для проведения самых сложных имитационных исследований достаточно самого простого Интернет-планшета.

В статье последовательно рассматриваются сервис-ориентированный подход (SOA) к разработке САИИ, особенности построения облачных SOA-приложений, структура и возможности облачной САИИ на основе GPSS World.

Сервис-ориентированный подход к разработке САИИ

Сервис-ориентированная архитектура (SOA) – современный подход к разработке распределенных модульных приложений, основанный на выделении в качестве элементарных блоков приложения IT-служб (сервисов), взаимодействующих между собой посредством обмена стандартизированными сообщениями через вычислительную сеть. За счет стандартизации интерфейса служб и использования вычислительной сети в качестве "связующего элемента", построенные на принципах SOA приложения являются гетерогенными и распределенными в том смысле, что принципы внутреннего построения и надлежащей архитектуры отдельных служб являются несущественными, как и их физическое нахождение. Службы являются автономными и многократно используемыми.

На рис. 1 приведена архитектура распределенного SOA-приложения для моделирования движения воздушных судов в аэродромном воздушном пространстве [1] – указаны технологии реализации отдельных служб и физическое их местоположение. Служба ИМ здесь является программным интерфейсом облачной имитационной среды, программные и аппаратные особенности которой скрыты от разработчика.

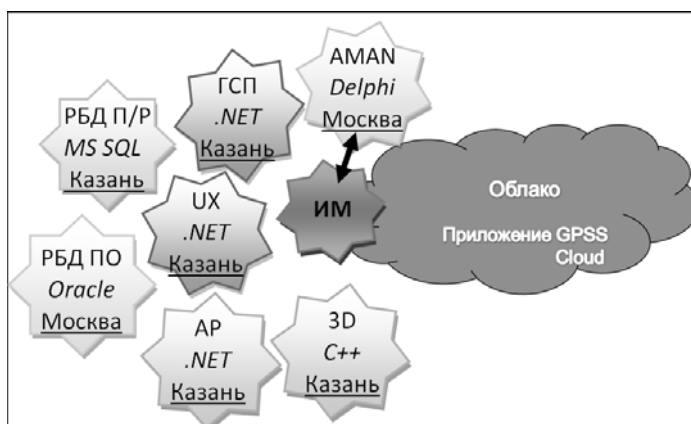


Рис. 1. Пример построения SOA-приложения:

РБД ПО – распределенная БД предметной области; БД П/Р – БД проектов и результатов;

АР – анализ результатов; ИМ – имитационное моделирование;

UX – интерфейс пользователя; АМАН – внешняя служба, выполняющаяся в согласовании с ИМ; ГСП – генерация случайных потоков

Несмотря на стандартную структуру сообщений, которыми обмениваются службы, имеются некоторые отличия в формате передаваемых данных (XML, JSON, двоичные данные) и транспортном протоколе (HTTP, TCP). Поэтому необходимо применять шаблон сервисной шины ESB (Enterprise Service Bus) [2].

ESB – особый способ построения SOA-решений, при котором службы, составляющие приложение, развертываются вокруг сервисной шины, образующей среду для взаимодействия служб. Если SOA-приложение рассмотреть как оверлейную сеть, образованную над вычислительной сетью, то сервисная шина выступает здесь в роли сетевого коммутатора, выполняющего две основные функции – маршрутизацию и преобразование протокола передачи данных. Дополнительно ESB может выполнять функцию балансировки нагрузки. ESB реализуется в виде одной или нескольких равноправных служб, называемых ESB peers. Обращение клиентов к функциям облачного приложения реализуется через сервисную шину (служба **ИМ** на рис. 1).

Особенности построения облачных САИИ

Облачные вычисления – особый вид удаленных «вычислений по требованию» (utility computing), представляющий собой IT-среду, которая позволяет разрабатывать и использовать *облачные службы*, доставляемые с помощью SOA. Под облаком понимается виртуальная сущность наподобие Интернет-сервера, предоставляющая "ПО как услугу" (Software as a Service – SaaS) в виде SOA-стандартизированной облачной службы, являющейся интерфейсом облачного приложения, построенного на архитектурах multi-tenancy и виртуализации. Архитектура «Multi-tenancy» означает, что один экземпляр приложения обслуживает множество пользователей (1:M), в идеале всех пользователей [3]. Это позволяет достичь масштабируемости, надежности, эффективности и низкой себестоимости.

Облачное приложение – композитное приложение, размещенное в облаке и состоящее из служб, взаимодействующих между собой в соответствии с каким-либо шаблоном проектирования SOA, например ESB.



Рис. 2. Упрощенная реализация облачного SaaS-моделирования

Приведенная на рис. 2 архитектура является упрощенной реализацией облачного моделирования по концепции SaaS на основе SOA/ESB. Интерфейсом облачного приложения служит имитационная сервисная шина (SSB), являющаяся связующим звеном между клиентскими приложениями и бизнес-логикой облачной среды. Под клиентскими приложениями здесь понимаются различные типы САИИ. Все САИИ являются облачными в том смысле, что полный свой функционал по проведению имитационных исследований реализуют только при «подключении» к облаку. Однако по типу клиентской (пользовательской) части их можно разбить на классические САИИ для настольных ПК и ноутбуков, мобильные САИИ для Интернет-планшетов, веб-САИИ, реализованные в виде веб-приложений, и кросс-платформенные САИИ.

Имитационная сервисная шина перенаправляет запросы от различных типов САИИ к соответствующим службам моделирования или службам других этапов имитационных исследований. SSB также способствует передачи данных в реальном масштабе времени (РМВ) между облачным приложением и САИИ – управление процессом моделирования и вывод текущего состояния моделирования. Последнее особенно актуально для динамической визуализации моделируемого процесса.

Облачная САИИ может быть реализована в двух вариантах – обычное публичное облако (public cloud), доступное через Интернет, и частное облако (private cloud), доступное в корпоративной или локальной сети.

Структура и возможности GPSS Cloud

GPSS Cloud является концепцией облачного моделирования, использующей GPSS World в качестве языка моделирования. Другими словами, это облачная реализация настольной моделирующей системы GPSS World. GPSS Cloud реализует единую облачную имитационную среду, возможности которой показаны на рис. 3.

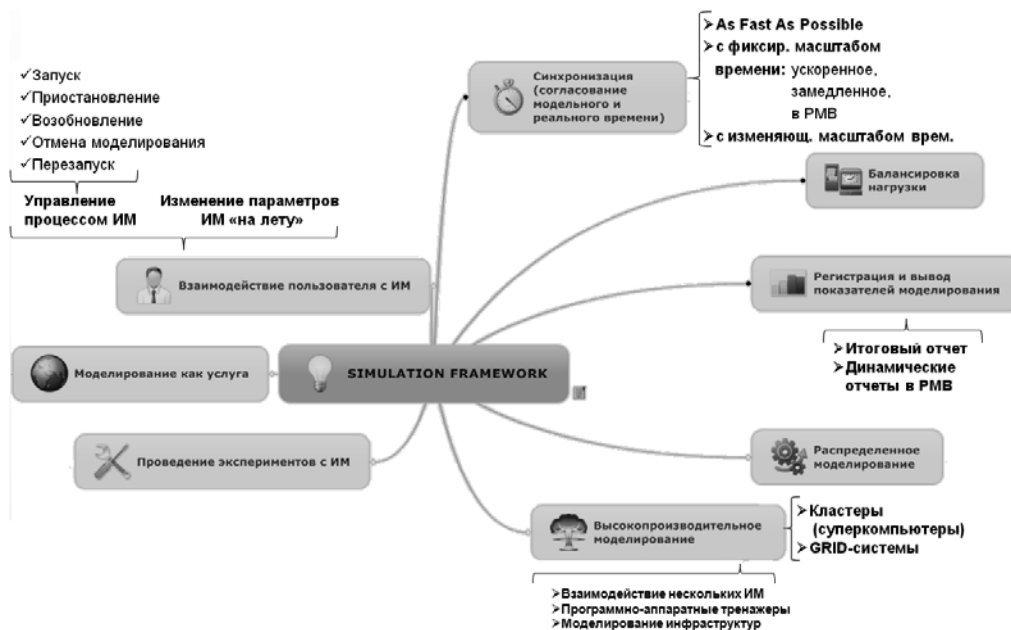


Рис. 3. Возможности GPSS Cloud

Единая среда GPSS Cloud поддерживает следующие типы моделирования:

1. Обычное моделирование – независимое выполнение ряда имитационных экспериментов для одной модели в режиме «как можно быстрее» с динамическим мониторингом данных – параллельное выполнение не связанных (изолированных) друг с другом моделей или серии экспериментов.

2. Высокопроизводительное моделирование – выполнение сложной модели с применением суперкомпьютерных технологий.

3. Распределенное моделирование – согласованное выполнение сложной модели, состоящей из составных моделей, сторонних служб и служб взаимодействия с пользователем в РМВ.

По структуре GPSS Cloud включает в себя ряд служб, реализующих отдельные этапы имитационных исследований (согласно рис. 2):

- обычное ИМ;
- распределенное ИМ;
- высокопроизводительное ИМ;
- планирование экспериментов;
- оптимизация;
- сложные расчеты;
- графические расчеты (2D, 3D, стерео-3D);
- анализ результатов.

Под распределенным моделированием понимается согласованное во времени выполнение моделей, сторонних IT-служб и взаимодействие с пользователем. Сторонние службы, как и САИИ, подключаются к облачному приложению через SSB.

Служба распределенного ИМ включает в себя универсальные часы моделирования и выполняет две функции:

- 1) согласование выполнения отдельных имитационных моделей;
- 2) согласование выполнения сложной ИМ в РМВ для взаимодействия с пользователем.

Под экспериментом понимается выполняющаяся реализация модели, которая:

- 1) создается службой ИМ;
- 2) является виртуальной службой;

3) реализует *универсальный интерфейс модели*.

Универсальный интерфейс модели позволяет передавать данные в модель, управлять процессом моделирования, запрашивать данные из модели. Под *сторонней службой* понимается служба, реализующая *универсальный интерфейс модели*, и тем самым не отличимая от эксперимента, что позволяет интегрировать ее наравне с другими моделями GPSS в единую сложную имитационную модель. Сторонними службами могут быть модели, написанные на других языках, а также прочие программные и аппаратные средства, «обернутые» в SOA-службу. Под пользователем понимается сторонняя SOA-служба, взаимодействующая с пользователем для выполнения следующих функций:

- 1) управление процессом ИМ (приостановление, возобновление, отмена) в PMB;
- 2) изменение параметров моделирования «на лету»;
- 3) получение данных о ходе ИМ в PMB.

Перечислим возможности единой имитационной среды GPSS Cloud.

1. Реализация концепции SaaS («ПО как услуга»).
2. Расширение возможностей GPSS World:
 - синхронизация;
 - удаленное управление процессом моделирования;
 - передача данных в PMB.
3. Инвариантность к платформам и технологиям САИИ.
4. Инвариантность к местонахождению компонент САИИ.
5. Реализация высокопроизводительного ИМ.
6. Реализация распределенного ИМ с синхронизацией имитационных моделей.

Заключение

Предложенная инфраструктура облачного моделирования на основе GPSS Cloud существенно оптимизирует проведение имитационных исследований, а также делает его более доступным для широкого круга пользователей и организаций. К настоящему времени выполнена апробация имитационной сервисной шины (SSB) в имитационном приложении моделирования работы судостроительного дока и исследовательском комплексе моделирования движения воздушных судов в аэродромном пространстве.

Литература

1. **Alexandrov V., Sikachev V.** Airport Airspace Traffic Simulation Research System. Computer Data Analysis and Modeling: Complex Stochastic Data and Systems: Proc. of the Ninth Intern. Conf., Minsk, Sept. 7–11, 2010. Vol. 2. P. 88–91 Minsk: Publ. Center of BSU, 2010.
2. Community Site for SOA Design Patterns <http://soapatterns.org> Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Enterprise_service_bus
3. The Cloud and SOA – Creating an Architecture for Today and for the Future by Capgemini in collaboration with HP Invent

**ТЕХНОЛОГИЯ КОГНИТИВНОГО ИМИТАЦИОННОГО
ПРОГРАММИРОВАНИЯ****В. В. Александров, В. В. Александрова, А. А. Зайцева (Санкт-Петербург)****Введение**

Мир образов доставляется идеей (или формой), которая ограничивает бесконечное, осуществляя «вписывание» образа в упорядоченный семантический, смысловой ряд. Однако биологический разум порождает несуществующие химеры, невозможные в физическом пространстве фигуры: «лента Мебиуса», «лестница Эшера» и другие [1], строит абстракции субстанциональности точки, числа, бесконечности и т.д. На протяжении последних 50 лет наблюдается научно-технологическое переоснащение. Биологическое время накопления знаний в прошлые века соответствовало времени существования неизменных технологических циклов. В то же время научная фантастика пытается примирить высокий темп накопления узкоспециализированных научных знаний, распространяя их на социальную реальность. Это один из видов переосмысления консервативности мышления общественного сознания.

Все эти знания, «врожденные идеи» – эксклюзивные качества биологического разума человека. Для электронного разума – это лишь увеличение разрешения, скорости обработки, передачи и архивации без возможностей интеллектуального и семантического поиска [2]. Для биологического – видение и понимание – единый процесс многофункциональности «интеллектуальной оптики».

На рис. 1 приведены структурные составляющие цифровой технологии объемного когнитивного программирования сложных пространственных форм. Каждая из этих составляющих имеет собственную технологическую специфику оборудования (hardware). Его высокая на сегодняшний день стоимость, конечно, ограничивает применение 3D-принтеров и 3D-сканеров. Проблема же в большей степени в профессиональной специфике интеграции и совместимости программных интерфейсных продуктов для 3D-сканирования, объектного когнитивного программирования (творческий процесс) и построения сложных объемных пространственных форм, учитывающих специфику твердотельного воспроизводства.

Несмотря на универсальность структуры, для каждого типа технологического воспроизводства конечного результата возникает проблема взаимной адаптации оборудования.

Развитие цифровых технологий привело к возможности сканирования объемных трехмерных объектов, компьютерного 3D-моделирования, которое опирается на психофизиологические творческие свойства разума (фантазмы) при воспроизводстве твердотельных пространственных объектов.

Скульптуры, конструкторские детали, различные предметы выращиваются, собираются в единое целое, в отличие от традиционной технологии «отсечения лишнего» [3].

Это явный качественный скачок промышленной цифровой технологии когнитивного программирования объемного компьютерного моделирования. В отличие от традиционных методов программирования, опирающихся на специфические языки и операционную систему компьютера, когнитивное программирование опирается на развитый интерфейс цифровых технологий, перенося неформализуемый творческий процесс в цифровую форму протоколов и форматов.

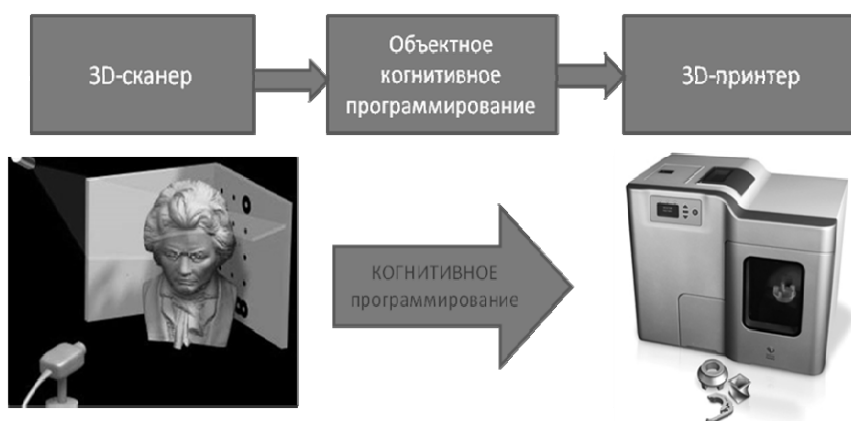


Рис. 1. Концептуальная схема системы когнитивного программирования

Технологии быстрого прототипирования

3D-принтеры воспроизводят твердотельные сложные пространственные формы из различных материалов, таких как пластик, порошки металла, керамика, фотополимерные и биоматериалы и др. В основе любого из способов 3D-печати лежит принцип послойного выращивания твердотельного объекта. Производители 3D-принтеров постоянно расширяют их технологические и функциональные возможности [4, 5].

Создание физического прототипа твердотельной модели проводится в несколько этапов [6]:

1. Разработка твердотельной модели программно или 3D-сканированием. Основная проблема состоит в соблюдении требований к замкнутости поверхностных контуров. Необходима интерфейсная поддержка соответствия формы и свойств разрабатываемой модели и используемого программного обеспечения. Программная разработка подразумевает знание таких программных сред, как 3D Studio Max®, AutoCAD®, SolidWorks®, Rhino® и другие. При работе с облаком точек используются Rapidform®, CopyCad, Geomagic Studio и узкоспециализированные программные среды для конкретных областей применения (ювелирная промышленность, архитектурный дизайн, конструкторские пакеты программ).

2. Экспорт 3D-модели в стандартные форматы для 3D-печати, такие как STL, WRL (VRML), PLY, 3DS и ZPR, при помощи различного программного обеспечения, такого как 3D Studio Max®, MicroStation®, 3DStudio Viz®, Mimics®, Alias®, Pro/ENGINEER, AutoCAD® или Raindrop GeoMagic®, SolidWorks®, Rapidform® и другие.

3. Адаптация программной модели к специфическим свойствам твердотельного копирования: разбиение на слои в поперечном сечении (при этом толщина каждого слоя соответствует разрешающей способности оборудования по z-координате); построение системы поддержки на элементы, крепление которых происходит в верхних слоях.

4. Послойная печать физического прототипа.

Области применения и перспективы развития

Несмотря на то, что на данный момент наблюдается повышенный интерес к технологии 3D-репликации (основной всплеск количества публикаций по этой теме наблюдался в 2005–2007 годах, например [7, 8]), основное ее развитие идет по пути развития аппаратных средств, повышения разрешающей способности 3D-принтеров и 3D-сканеров. При этом точности построения (восстановления) виртуального объекта

уделяется меньше внимания, хотя данный этап является связующим между получением множества вокселей и формированием «твердой копии» объекта.

Проблема состоит в различии технологии представления элементарных точек при сканировании и печати, что соответственно порождает различные способы представления данных, получаемых со сканера и требующихся для работы принтеру.

Отсканированный объект формируется путем последовательного замера расстояний от сканирующей головки до объекта, что формирует множество точек, принадлежащих поверхности объекта (облако точек). При этом в это множество не попадают точки, оказавшиеся в «теневой области» т. е. оказавшиеся на пути сканирующего луча и закрытые другими фрагментами сканируемого объекта, а также точки, определяющие локальные особенности поверхности, но не учтенные в связи с ограниченной разрешающей способностью сканирующей системы [6].

В свою очередь, принтер требует для работы входные данные, представленные в формате STL (расшифровывается как STereoLithography), представляющем список треугольных граней, описывающих его поверхность. Трехмерная геометрия в ведущих 3D CAD-системах описывается поверхностями высокого порядка, а при триангуляции поверхность модели разбивается на маленькие треугольники. Каждый фасет описывается четырьмя наборами данных: координаты XYZ каждой из трех вершин и нормальный вектор, который описывает ориентацию фасета [8].

С учетом описанных сложностей можно выделить следующие области научной, экономической и художественной деятельности человека, в которых использование систем когнитивного программирования обосновано и актуально:

- творчество (скульптура, архитектура, ландшафты, светозвуковые лазерные инсталляции);
- промышленное производство (оптимизация стоимости энергетики, разработка новых видов технологии, судо- и кораблестроение, космическая промышленность, робототехника, высокоточные производства);
- живые организмы и биотехнические системы (воспроизводство биологических объектов, реплицирование, виртуализация – томография, лазерное, радарное сканирование трехмерного видения объекта).

Некоторые принципы построения трехмерных моделей

На рис. 2 приведена визуализация трехмерных объектов в формате STL: сетка из треугольников определяет контуры объекта с наложенной на них текстурой, которая отражает «реальный» вид объекта. Трехмерная модель создана в среде 3D Studio Max с использованием модификатора вращения и редактируемых сплайнов (кривых). Моделирование объектов на основе сплайнов является одним из видов трехмерного моделирования, широко распространенным в компьютерной графике. В ряде случаев визуализированные сплайны используются в виде самостоятельных объектов для моделирования, как это показано на примере моделей колокольчиков (рис. 3).

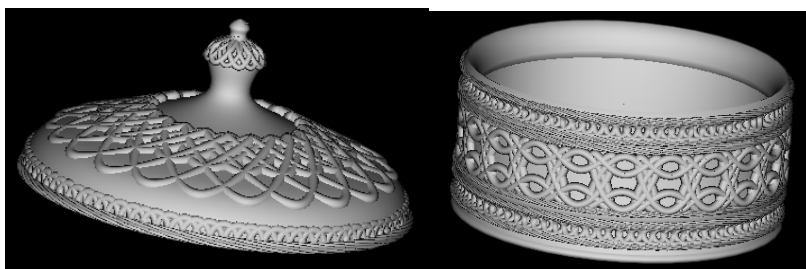


Рис. 2. Визуализация трехмерных объектов в формате STL

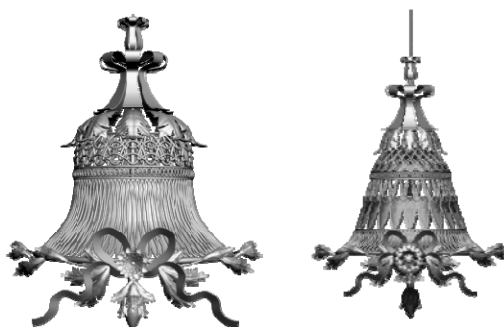


Рис. 3. Использование визуализированных сплайнов как самостоятельных объектов для моделирования

Однако гораздо чаще сплайны используются не как самостоятельные объекты, а как вспомогательные элементы при создании поверхности трехмерного объекта. Также для модификатора вращения возможно использовать NURBS-кривые. Для построения твердотельных моделей наиболее удобно применять NURBS-технологию.

Приведенный ниже пример (рис. 4, а, б) демонстрирует особенности построения пространственных объектов при помощи NURBS-сплайнов. В первом случае при построении объекта сплайны последовательно соединены между собой с помощью операции U-лофтинга, в результате чего образовалась единая поверхность. Однако такое соединение привело к деформации корпуса объекта – рыбы (см. рис. 4, а).

Во втором случае созданы две поверхности – одна объединяет голову и жабры объекта: сплайны, представляющие собой их сечения, последовательно соединены между собой с помощью операции U-лофтинга. Другая поверхность, созданная аналогичным образом, объединяет туловище и хвост рыбы. Построение поверхности головы было закончено на том сплайне, с которого началось построение поверхности туловища.

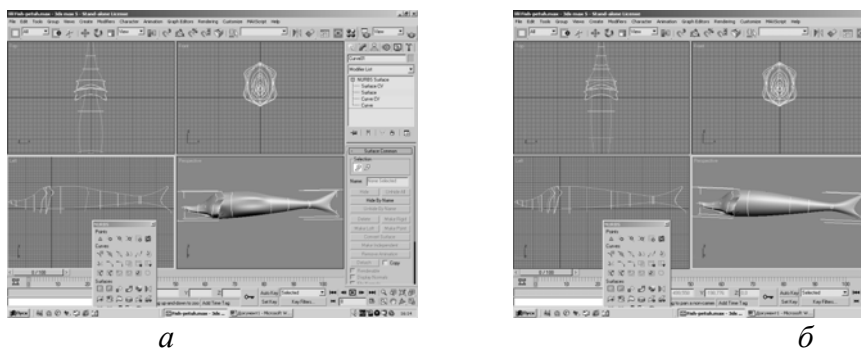


Рис. 4. Построение пространственных объектов при помощи NURBS-сплайнов

В этом случае модель состоит уже не из одной, а из двух отдельных поверхностей, но деформация корпуса устранена (см. рис. 4, б).

Применение NURBS-технологии не всегда оправдано, так как многие модели строятся путем операций над полигонами при помощи модификаторов полигонального моделирования. Иногда в моделях сочетаются оба вида моделирования (рис. 5). Некоторые детали головы и шея модели – результат NURBS-моделирования.

SolidWorks и AutoCad Mechanical Desktop могут помочь в создании как конструкторского, так и дизайнерского проекта с любой стартовой точки: концепции, эскиза или CAD файла. При этом процесс перевода описания виртуального 3D-объекта, представленного в виде множества вокселей, принадлежащих его поверхности, в описание поверхности в виде треугольных граней схож с задачей векторизации изображения и не всегда может дать однозначный и удовлетворительный результат.



Рис. 5. Сочетание NURBS-моделирования и модификаторов полигонального моделирования

Наиболее тонким и трудоемким процессом в создании авторских уникальных разработок является придание им совокупности черт, которые обеспечивают узнаваемость объектов. Это как раз и является той творческой составляющей в дизайне, будь то создание ювелирных изделий или архитектурных сооружений, которая отличает создание оригинальных авторских произведений от непосредственного копирования или собирания сложных форм из простых элементов. В концепции когнитивного программирования это является творческим процессом, позволяющим воплотить мир воображения в реальность [9].

Заключение

Цифровые технологии 3D-прототипирования совместно с когнитивным программированием открывают уникальные возможности воспроизведения – «печати» сложнейших пространственных форм и механизмов. Реализация этих возможностей связана с цифровой технологией управления материальными частицами в объемной среде принтера, где и осуществляется полимеризация, определяющая свойства воспроизводимого объекта. Для эффективной работы необходимо согласование компьютерной модели через универсальный язык с промышленной технологией 3D воспроизводства.

По примеру развития систем трехмерного компьютерного моделирования пространственных объектов, в которых постоянно обновляется палитра инструментов, для каждого направления промышленных 3D-принтеров необходимо разрабатывать программные прототипы воспроизводства типовых объемных форм. При этом возникает потребность в разработке интерфейсных программ взаимодействия между компьютерным моделированием объектов с их реализацией (в рамках системы объектного когнитивного программирования) и в реализации унифицированного процесса трехмерного моделирования при прохождении всех стадий от сканирования трехмерных объектов до получения конкретного образца технологией быстрого прототипирования. Экономическая эффективность такой технологии в ее принципиальной безотходности и низкой себестоимости массового производства.

Литература

1. **Hofstadter D. A.** Godel, Esher, Bach: An eternally golden braid. N.Y.: Harvester Press, 1979. 843 p.
2. **Александров В. В., Сарычев В. А.** DIGITAL AVATAR – Цифровое воплощение инфокоммуникационных систем. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 7. С. 3–10.

3. **Александров В. В., Сарычев В. А.** Цифровые программируемые технологии // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8. № 11. С. 3–9.
4. **Татарников О.** Атака клонов! 3D-сканирование и трехмерная печать // Компьютер-пресс. 2003. № 7. С. 9–14.
5. **Афанасьев К.** 3D-принтеры. – <<http://www.3dnews.ru/peripheral/3d-print/print/>>
6. **Александров В. В., Александрова В. В., Зайцева А. А., Хурс С. П.** Цифровая технология 3D промышленного производства // Труды СПИИРАН. 2010. Вып. 15. С. 85–94.
7. **Boppa V. Chowdary, Divesh R. Sahatoo, Raj Bhatti.** Some STL File Generation Issues in Rapid Prototyping // Fifth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2007) “Developing Entrepreneurial Engineers for the Sustainable Growth of Latin America and the Caribbean: Education, Innovation, Technology and Practice”, 29 May – 1 June 2007, Tampico, México.
8. **Гладков В. И., Кулагин В. В., Круглов С. М.** Создание технологических систем оперативной подготовки производства новой техники на базе современных средств быстрого прототипирования. // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». М.: Изд-во «МАМИ», 2008. С. 169–175.
9. **Александрова В. В.** Компьютерное моделирование и симуляция трехмерных тел, фигур и сцен. Учебное пособие. СПб.: Анатолия, 2008. 132 с.

**КОМПЛЕКС ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО
ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ В АЭРОДРОМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ****В. В. Александров (Казань), В. Ю. Сикачев (Москва)****Введение**

В докладе описывается вторая версия имитационного комплекса, предыдущая версия которого была представлена на конференции «ИММОД-2009»[1]. Комплекс предназначен для решения следующих задач:

- исследование структуры аэродромного пространства и анализ его пропускной способности;
- поддержка разрабатываемых процедур и средств управления очередями прибывающих в аэропорт и убывающих из него воздушных судов (ВС).

Обеспечивается непрерывный технологический цикл проведения исследований, включающий следующие этапы:

- предварительная подготовка исходных данных;
- формирование сценария моделирования;
- динамическое моделирование управляемого движения воздушных судов;
- 2D- и 3D-визуализация моделируемого процесса;
- документирование и хранение результатов.

Имитационный комплекс предназначен для работы совместно со средствами поддержки принятия решений по управлению очередями воздушных судов в аэродромном пространстве – «Менеджером прилета» (AMAN) и «Менеджером вылета» (DMAN), что позволяет оценивать эффективность вырабатываемых этими средствами мер регулирования. Отличительными возможностями новой версии являются поддержка совместного управления прилетом/вылетом, а также реализация 3D-анимации.

Комплекс разрабатывается компанией ООО «Элина-Компьютер» в соответствии с техническим заданием от ФГУП «ГосНИИАС», которое занимается созданием средств AMAN и DMAN.

Модель управляемого движения ВС

На рис. 1 упрощенно представлена модель предметной области: аэродромное воздушное пространство с одной физической взлетно-посадочной полосой (ВПП), работающей в оба направления (ВПП 11 на прилет и ВПП 29 на вылет), четыре воздушные трассы (ВТ), маршруты прилета и вылета.

Прилетающие ВС заходят в аэродромное пространство через точки схода с ВТ (Т.сх.), после пролета которых они движутся по маршруту прилета и STAR (Standard Terminal Arrival Route – стандартный маршрут прибытия по приборам), ведущему на ВПП. Маршрут прилета – это маршрут подхода к STAR, который в небольших аэропортах может отсутствовать. На рис. 1 показаны две точки схода – А и Е. От точки А имеются два варианта полета: 1) маршрут прилета А→Б→В→Г и STAR и 2) маршрут прилета А→Д и STAR. Точка схода Е непосредственно ведет на STAR – маршрут прилета отсутствует. За заданное время до планового пролета точки схода имеется возможность применить меры управления к прилетающему ВС (горизонт управления): задержать в точке схода (полет в зоне ожидания), изменить маршрут прилета/STAR/ВПП.

Вылетающие ВС, совершая взлет с ВПП, движутся по SID (Standard Instrument Departure – стандартный маршрут вылета по приборам), возможному маршруту вылета и выходят на ВТ через точку выхода (Т.вых). К вылетающим ВС также могут быть применены меры регулирования за заданное время до планового времени взлета. На

рис. 1 от ВПП 29 ведут два маршрута SID, один из которых ведет на маршрут вылета $K \rightarrow I \rightarrow J$, а другой непосредственно связан с точкой выхода Л.

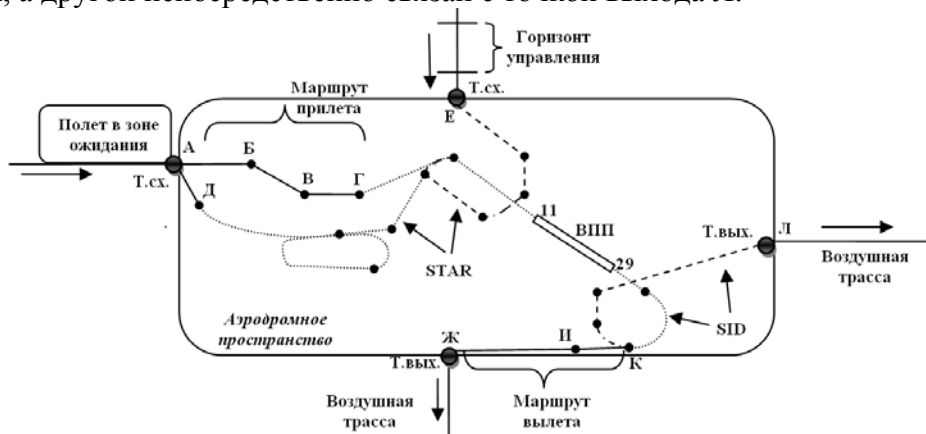


Рис. 1. Модель предметной области

Проверяется соблюдение потоком убывающих и прибывающих ВС временных норм продольного эшелонирования на пороге ВПП, точках схода с ВТ, точках выхода на ВТ, точках начала STAR, точках конца SID. Так, согласно рис. 1, проверяются нормы эшелонирования в точках А, Е, Л, Ж, Г, К. Нормы эшелонирования на ВПП задаются с учетом категории турбулентности ВС (легкий, средний и тяжелый) и типа рейса (прилет, вылет). Кроме того, вводятся дополнительные нормы эшелонирования, учитывающие взаимосвязь между ВПП.

Структура имитационного комплекса

Комплекс моделирования (рис. 2) представляет собой сложное информационно-ориентированное распределенное имитационное приложение, состоящее из следующих подсистем (п/с):

- подсистема манипулирования и отображения АНИ, осуществляющая автоматизированное создание, хранение и редактирование данных АНИ аэродромного пространства, хранение реальных потоков прибывающих/убывающих ВС, а также формирование и хранение исследовательских случайных потоков;
- подсистема подготовки сценария моделирования, предназначенная для выбора моделируемого аэропорта и соответствующей АНИ, задания временных параметров моделирования и параметров, связанных с управлением ВС (нормы эшелонирования, горизонт управления), настройки на исследовательский поток ВС;
- подсистема динамического моделирования, осуществляющая генерацию модели на языке GPSS в соответствии с подготовленным сценарием моделирования, управление процессом моделирования (запуск, пауза, останов), регистрацию оперативных данных по текущему состоянию потока ВС, корректировку процесса моделирования движения конкретного ВС в соответствии с вырабатываемыми управляющими командами от AMAN и DMAN;
- подсистема оперативной визуализации, осуществляющая отображение АНИ, динамическое отображение ВС и соответствующего ему формуляра, графическую индикацию различных состояний ВС (положение относительно горизонта регулирования, нарушение эшелонирования, применение мер регулирования), оперативный расчет и отображение отдельных показателей процесса выполнения управляемых полетов;
- подсистема автономной визуализации, выполняющая «постполетный» расчет и отображение показателей эффективности регулирования, отображение 2D- и 3D-анимации смоделированного процесса, вычисление статистических характеристик показателей, формирование журнала событий моделирования, архивирование смоделированного процесса.

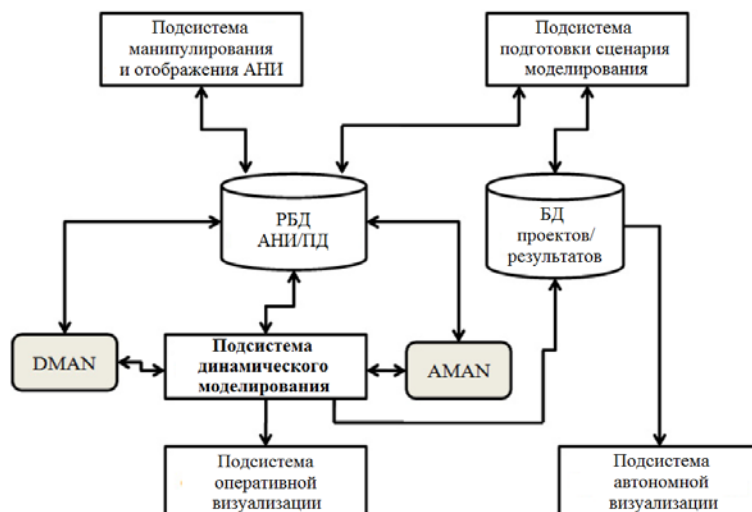


Рис. 2. Структурная схема исследовательского комплекса

АНИ/ПД – АНИ и полетные данные, РБД – распределенная БД

Особенности реализации

Являясь ядром имитационного комплекса, подсистема динамического моделирования осуществляет запуск и управление процессом моделирования, принимает от моделирующей машины данные в реальном масштабе времени для их последующего отображения в подсистеме оперативной визуализации. Но более важной задачей является синхронизация распределенных подсистем комплекса. Синхронизация обусловлена не только техническими характеристиками подсистем, но и тем фактом, что комплекс моделирования представляет собой не автоматическое, а автоматизированное приложение, включая, таким образом, в контур регулирования ВС человека-оператора, подтверждающего окончательное решение, предложенное АМАН и/или ДМАН [2]. Соотношение полетного, модельного и реального времени определяется по формуле:

$$t_{\text{полетное}} = t_{\text{модельное}} \times R_{\text{вр}} + T_{\text{нач}},$$

$$t_{\text{реальное}} = t_{\text{модельное}} + t_{\text{нач}},$$

где $R_{\text{вр}}$ – отношение «модельное/полетное время», $t_{\text{нач}}$ – реальное время начала моделирования, $T_{\text{нач}}$ – полетное время начала моделирования. Для решения поставленной задачи взаимодействия подсистем комплекса предложен сервис-ориентированный подход к построению имитационных приложений [3].

Результаты моделирования

По каждому прогону имитационной модели имеется возможность просмотреть отчет моделирования, журнал событий моделирования, а также 2D- и 3D-анимацию. В журнале моделирования регистрируются события-уведомления и события-нарушения. Последние события содержат данные о нарушениях норм эшелонирования с указанием времен, и типов ВС и типов рейсов. По каждому событию можно перейти в 3D-анимацию. Отчет моделирования содержит сведения о сценарии моделирования и итоговые показатели моделирования.

На рис. 3 показаны результаты моделирования, представленные в подсистеме оперативной визуализации. Приведен случайный поток прибывающих и убывающих ВС в воздушном пространстве международного аэропорта Казань. Отображены все элементы аэронавигационной информации, динамически обновляются положения ВС и их состояния. Поддерживаются стандартные операции с картой (уменьшение, увеличе-

ние, управление слоями), а также управление процессом моделирования. Вычисляется ряд показателей эффективности управления на прилете/вылете, в том числе:

- общее число взлетевших/севших ВС;
- число случаев нарушения временного эшелонирования (по отдельности) в точках схода/выхода, в точках начала STAR/конца SID, на ВПП;
- суммарное время задержек на маршрутах прилета/вылета;
- суммарное изменение длины маршрута;
- число случаев изменения начального плана полета;
- число случаев выполнения кругов ожидания.

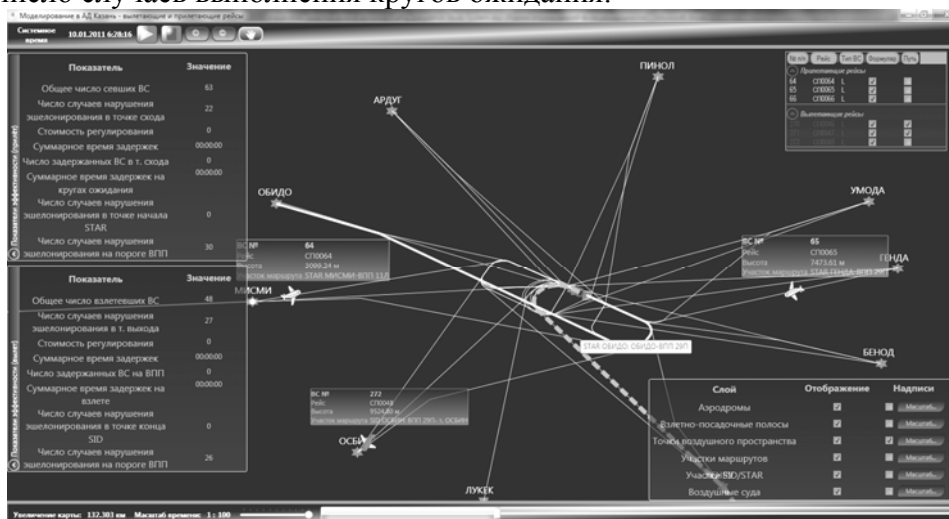


Рис. 3. Представление результатов ИМ – ситуационный дисплей

На рис. 4. показан фрагмент 3D-анимации подсистемы автономной визуализации – взлет ВС в воздушном пространстве международного аэропорта Шереметьево. Выводится список ВС, имеется возможность отобразить профиль полета и формуляр для каждого ВС, а также переключить камеру в «режим слежения» за ВС. Отображение осуществляется в системе координат WGS84. Динамически-подгружаемая 3D-модель Земли образована совмещением спутниковых графических изображений участков местности и цифровых данных об особенностях рельефа. Реализована возможность перемещения по 3D-пространству с помощью мыши (манипулирование камерой). Дополнительно возможен вывод анаглифного стереоизображения, для просмотра которого необходимы красно-синие 3D-очки.



Рис. 4. Представление результатов ИМ – 3D-анимация

Заключение

Разрабатываемый комплекс моделирования позволяет оценивать структуру аэродромного пространства, анализировать эффективность и оптимизировать процедуры управления потоком ВС в аэродромном пространстве. С помощью анализа показателей эффективности управления, а также результатов 2D- и 3D-визуализации моделируемого процесса можно сделать вывод об эффективности алгоритмов управления, реализованных в AMAN и DMAN, а также об организации воздушного пространства.

Литература

1. **Александров В. В., Сикачев В. Ю.** Исследовательский комплекс моделирования движения воздушных судов в аэродромном пространстве // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика». СПб., 2009.
2. **Дегтярев О. В., Сикачев В. Ю., Мучинский А. В.** Особенности задач имитационного моделирования процессов управления воздушным движением (на примере задачи моделирования прилета/вылета в аэропорту) // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика». СПб., 2009.
3. **Александров В. В., Сикачев В. Ю.** Имитационное моделирование управляемого движения воздушных судов в аэродромном пространстве // Сб. Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». М., 2011.

**СРЕДСТВО ГЕНЕРАЦИИ КОДА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ,
СОВМЕСТИМОЙ СО СТАНДАРТОМ HLA****В. А. Антоненко, Д. Ю. Волканов, М. В. Чистилинов (Москва)**

В настоящее время разработан целый ряд средств и языков моделирования. Основным стандартом в области специализированных средств моделирования распределённых систем является High Level Architecture (HLA) (IEEE 1516, 1516.2010) [1].

Одним из главных компонентов системы моделирования, описанным в стандарте HLA, является Runtime Infrastructure (RTI). Под RTI понимают среду передачи данных между компонентами, входящими в модель. Исходя из стандарта HLA, необходимо для каждой имитационной модели отдельно описать несколько десятков интерфейсов для взаимодействия с RTI. Следовательно, помимо затрат на построение самой модели, разработчику требуется дополнительно заниматься описанием интерфейсов для взаимодействия с RTI. В результате актуальна задача создания среды разработки HLA-совместимых моделей, в которой построение моделей осуществлялось бы при помощи текстового или графического языка описания моделей.

Требования к средству разработки модели

Основная цель разрабатываемого средства – абстрагирование пользователя (разработчика имитационных моделей) от описания интерфейсов для взаимодействия с RTI. При этом необходимо придерживаться подхода с использованием графической оболочки для построения модели, так как разработчик модели не обязан быть программистом. Исходя из этого, список требований выглядит следующим образом:

- *Графический интерфейс.* Наличие графической оболочки для построения имитационных моделей.
- *Создание HLA-совместимых моделей.* Возможность получения на выходе исходных кодов моделей с описанным интерфейсом для подключения к RTI.
- *Генерация кода по шаблонам.* Возможность генерации исходного кода модели (на C++) по представленной диаграмме состояний.
- *Свободная лицензия.* Необходимо, чтобы базовое средство распространялось по GPL лицензии.
- *Возможность верификации.* Следует проверять заданные функциональные свойства разрабатываемой имитационной модели, например, с использованием библиотеки UPPAL.

Существующие средства описания имитационных моделей

При создании средств описания имитационных моделей разработчики используют один из следующих подходов [2]:

- Создание языка с функциями поддержки моделирования.
- Написание специализированных модулей (библиотек классов), решающих задачи поддержки моделирования, для языка общего назначения.
- Создание графического интерфейса для описания моделей.

В первом случае создается (как правило, на основе синтаксиса существующего языка) новый язык, в котором разработчиками предусматриваются специальные конструкции, предназначенные для решения задач имитационного моделирования. Данные конструкции могут использоваться для управления модельным временем, для описания взаимодействия компонентов модели, функции, позволяющие записывать изменяемые параметры в трассу эксперимента. Примером такого языка моделирования является ММ-язык, используемый в среде моделирования DYANA [3].

При использовании второго подхода описанные выше функции реализуются в виде модуля языка общего назначения, например библиотеки классов и шаблонов C++ или Java. Примером такого языка моделирования является SLX [4].

Применение уже существующего языка позволяет упростить разработку моделей благодаря тому, что не требуется изучение разработчиками нового языка и возможно использование существующих программных средств (таких как среда разработки, транслятор, отладчик) и существующих библиотек программных компонентов.

Современные тенденции развития языков моделирования [5, 6] заключаются в уменьшении роли текстовых специализированных языков описания моделей, сведения их к использованию только для внутреннего представления. На практике же разработчики специализированных языков предоставляют графический интерфейс описания моделей (например, в виде диаграмм классов).

Из анализа открытой литературы было выделено несколько основных языков имитационного моделирования, доминирующих на рынке специализированного ПО для построения моделей, а так же проанализированы возможности языка UML. Рассмотрим особенности этих языков.

Modelica – свободно распространяемый объектно-ориентированный язык для моделирования сложных физических систем [7]. Язык имеет хорошую техническую поддержку разработчиков, для него существует большое количество библиотек компонентов. Modelica обеспечивает создание различных моделей: механических, электрических, гидравлических, химических.

В основе языка Modelica лежит концепция соединяемых блоков. При соединении в соответствии с требуемой схемой автоматически генерируются соответствующие уравнения. Это делает язык простым для понимания и использования специалистами нематематического профиля.

SLX. Язык SLX [4] основывается на широких возможностях языка имитационного моделирования GPSS/H. Обеспечивает большие возможности для моделирования современных систем, описываемых языками, похожими на C.

Основные особенности SLX позволяют создавать разнообразную логику, петли управления, расширения, диагностики. В дополнение к новым директивам SLX поддерживает традиционные макросы и модули расширения, применимые как при компиляции, так и в процессе исполнения.

Simulink – это интерактивная графическая система для анализа линейных и нелинейных динамических систем. Она позволяет моделировать систему простым перемещением блоков в рабочую область и последующей установкой их параметров. Simulink может работать с линейными, нелинейными, непрерывными, дискретными, многомерными системами [8].

Наиболее интересным с точки зрения моделирования встроенных систем является пакет Stateflow Simulink [9]. Stateflow – это интерактивный инструмент разработки в области моделирования сложных управляемых событиями систем. Он основан на теории конечных автоматов. Stateflow предлагает решение для проектирования встроенных систем с контролирующей логикой. Для описания логики модели Stateflow использует диаграммы состояний и переходов.

Диаграммы состояний языка UML являются хорошо известным средством описания поведения систем. Они определяют все возможные состояния, в которых может находиться конкретный объект, а также процесс смены состояний объекта в результате влияния некоторых событий. Из конкретного состояния в данный момент времени может быть осуществлен только один переход; таким образом, условия являются взаимно исключающими для любого события. Существует два особых состояния: вход и выход. Любое действие, связанное с событием входа, выполняется, когда объект вхо-

дит в данное состояние. Событие выхода выполняется в том случае, когда объект выходит из данного состояния.

Данные языки моделирования были проанализированы на предмет соответствия поставленным требованиям. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Отображение UML примитивов на XML объекты и шаблоны кода

Критерий	Modelica	SLX	Simulink Stateflow	UML
Графический интерфейс	+	-	+	+
Работа диаграммами состояний	+	-	+	+
Создание HLA совместимых моделей	-	-	-	-
Генерация кода по шаблонам	+	-	+	-
Свободная лицензия	-	+	-	+
Возможность верификации	+	-	+	+

Анализ показал несоответствие специализированных языков и сред разработки имитационных моделей предъявленным требованиям. Следовательно, необходимо разработать собственную систему построения имитационных моделей и генерации исходных кодов моделей, совместимых со стандартом HLA. Языки моделирования Modelica, Simulink Stateflow и UML удовлетворяют наибольшему количеству требований, но свободной лицензией из них обладает только язык моделирования UML. Далее описано средство для генерации кода имитационных моделей на основании диаграмм состояний UML.

Генерация кода моделей по диаграммам состояний UML

Средство для генерации кода имитационных моделей на основании диаграмм состояний UML (Генератор) было реализовано на языке Питон. Для создания и редактирования диаграмм состояний UML использовалось средство ArgoUML [10]. Однако генератор не работает напрямую с диаграммой UML, а только с её XML представлением. В качестве XML представления был выбран специализированный XML формат, предназначенный для работы с диаграммами состояний – State Chart XML [11]. Данный формат позволяет описывать конечные автоматы в общем виде на основе диаграмм состояний Харела. Используя SCXML, можно описать различные типы структур конечных автоматов. В качестве примера можно привести такие случаи, как вложенность, параллельность, синхронизация или параллельность подавтоматов.

Для работы с шаблонами генерации кода использовалась специализированная библиотека шаблонов Cheetah [12]. Суть работы данной библиотеки следующая: шаблон компилируется с помощью cheetah-компилятора в представление шаблонов на языке Питон. Данный файл используется загрузчиком питона для генерации выходного файла. Шаблон Cheetah состоит из комбинации выходного текста и кода, похожего на исходный код языка Питон.

На вход генератору подается диаграмма состояний языка UML и шаблон для генерации кода. Далее диаграмма переводится во внутреннее представление языка Питон. После создания SCXML файла, он подаётся на вход непосредственно генератору кода по шаблону, который генерирует **.h .cpp .fed** файлы. Для генерации кода федератов (с правильными интерфейсами для подключения к RTI) были созданы особые шаблоны: отдельно для **.h**, **.cpp** и **.fed** файлов. На рис. 1 представлена схема работы генератора кода моделей совместимых со стандартом HLA.

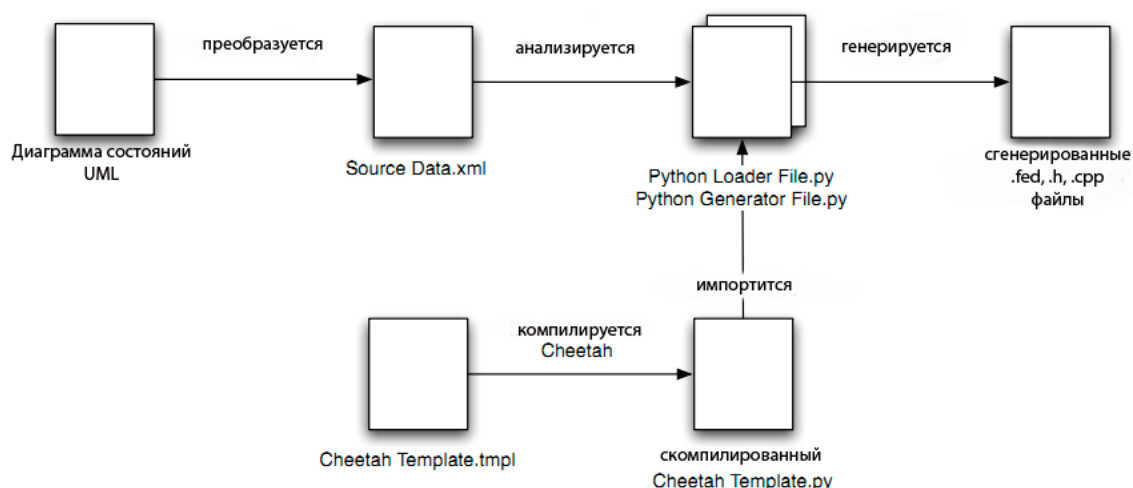


Рис. 1. Схема работы генератора кода

В результате на выходе получены исходные файлы моделей с интерфейсами для подключения к RTI. Сравнение сгенерированного и вручную написанного кода представлено на рис. 2 и 3.

```

2 #ifndef SM_STATE_FED_ARMED_H
3 #define SM_STATE_FED_ARMED_H
4
5 #include "sm_state.h"
6 #include "federate.h"
7
8 class SM_State_FED_Armed : public SM_State, Federate
9 {
10 public:
11
12 //-----
13 SM_State_FED_Armed( std::wstring_federationName, std::wstring_fddName);
14
15 //-----
16 ~SM_State_FED_Armed ();
17
18 //-----
19
20 //-----
21
22
23 void onentry ();
24
25 protected:
26
27 private:
28 //-----
29 void LockDoors();
30
31 //-----
32 // copy constructor not implemented
33 SM_State_FED_Armed( const SM_State_FED_Armed& );
34
35 // assignment operator not implemented
36 SM_State_FED_Armed& operator=( const SM_State_FED_Armed& );
37
38 //-----
39
40 void getHandles();
41 void customInit();
42 void loop();
43
44
45 //-----
46 }; // SM_State_FED_Armed
47
48

```

Рис. 2. Пример сгенерированного
header файла

```

17
18
19
20
21
22
23 //-----
24 //
25 // Class Name : SM_State_FED_Armed
26 //
27 //-----
28
29 SM_State_FED_Armed::SM_State_FED_Armed ()
30 {}
31
32 //-----
33 SM_State_FED_Armed::~SM_State_FED_Armed ()
34 {}
35
36 //-----
37 void SM_State_FED_Armed::onentry ()
38 {
39 LockDoors();
40 }
41
42 //-----
43 void SM_State_FED_Armed::LockDoors ()
44 {
45
46 std::cout << "SM_State_FED_Armed::LockDoors\n";
47
48
49 }
50
51 //-----
52

```

Рис. 3. Пример сгенерированного
cpp файла

Заключение

Обзор специализированных языков моделирования показал, что рассмотренные языки моделирования не обладают необходимой функциональностью для удобного описания HLA-совместимых моделей. Поэтому был сделан выбор в пользу создания специализированного средства для построения HLA-совместимых моделей с использованием в качестве языка моделирования диаграммы состояний UML. На основании

графического описания, дополненного кодом на C++, генерируется код HLA-совместимой модели на языке C++.

Было разработано средство для генерации кода HLA-совместимых моделей по шаблонам. Экспериментальные исследования показали работоспособность генерируемого кода в разрабатываемой системе имитационного моделирования. Реализованное средство позволяет сократить время разработки имитационной модели и будет входить в разрабатываемый комплекс полунатурного моделирования РВС РВ.

Литература

1. Simulation Interoperability Standards Committee of the IEEE Computer Society IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) Federate Interface Specification. 2000.
2. **Manuel Alfonseca, Juan de Lara, Estrella Pulido.** An object-oriented continuous simulation language and its use for training purposes.
(<http://www.ii.uam.es/~alfonsec/docs/simul98f.htm>)
3. **Smeliansky R. L., Bakhmurov A. G., Kostenko V. A.** DYANA – An Environment For Simulation And Analysis Of Distributed Multiprocessor Computer Systems // Proceedings of TACAS'99, 1999.
4. The SLX-HLA-Interface Homepage [HTML]
(<http://www.strassburger-online.de/SLX.html>)
5. **Rajesh Mansharamani.** An overview of discrete event simulation methodologies and implementation // SADHANA. 1997. Vol. 22. No 5. P. 611–627.
6. **Nance R. E.** A history of discrete event simulation programming languages. Blacksburg, United States: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1993.
7. Modelica – A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling Tutorial [PDF] (<https://www.modelica.org/documents/ModelicaTutorial14.pdf>)
8. Simulink Tutorial [PDF]
(http://academic.csuohio.edu/dong_1/EEEC510/material/Simulink%20Tutorial.pdf)
9. OMG Unified Modeling Language Specification [PDF]
(<http://www.omg.org/spec/UML/1.4/PDF>)
10. ArgoUML site [HTML] (<http://argouml.tigris.org/>)
11. State Chart XML (SCXML): State Machine Notation for Control Abstraction, W3C Working Draft 26 April 2011 [HTML] (<http://www.w3.org/TR/scxml/>)
12. Cheetah Users' Guide [PDF] (http://www.cheetahtemplate.org/docs/users_guide.pdf)

СРЕДА ИМИТАЦИОННОГО СОБЫТИЙНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**Е. А. Бабкин, В. В. Разиньков (Курск)**

В настоящее время существуют и продолжают развиваться различные виды программных средств имитационного моделирования, используемых как для решения сложных прикладных задач, так и для обучения. Выделяются следующие разновидности инструментария имитационного моделирования [1, 2]: библиотеки поддержки имитационного моделирования, языки имитационного моделирования, интегрированные среды. Библиотеки поддержки предоставляют низкоуровневый интерфейс разработки программной модели, связанный с некоторым языком программирования, что усложняет процесс разработки (особенно для сложных моделей), однако они обладают наибольшей гибкостью для разработчика. Языки имитационного моделирования (GPSS и др.) освобождают от знания какого-либо языка программирования, предоставляя в качестве инструментария разработки набор собственных операторов определенного формата. Интегрированные среды являются наивысшим развитием программных средств имитационного моделирования и, помимо визуального процесса разработки и выполнения модели, предоставляют широкие возможности статистического анализа результатов моделирования.

Одной из проблем при обучении основам моделированию, как показывает опыт, является малая эффективность обучения, как с использованием аналитических моделей, так и моделей на языках имитационного моделирования, поскольку построение аналитических моделей возможно только для простых систем, а моделирование на языках имитационного моделирования, позволяющих описывать сложные системы, достаточно трудоемко. Кроме того, интегрированные среды моделирования, использующие визуальное представление моделей, достаточно громоздки, имеют большую стоимость и ориентированы на промышленное применение, а не на учебный процесс. Также данные среды не позволяют изучать механизм моделирования, представления моделей в терминах событий. Они дают возможность изучать технологию моделирования на уровне внешнего интерфейса среды имитационного моделирования. Последний фактор имеет большое значение, поскольку при изучении компьютерного моделирования ставятся различные задачи: от изучения внутренней организации систем моделирования до решения задач с помощью этих систем. В связи с этим актуальной является разработка среды имитационного моделирования, ориентированной на процесс обучения, с графическим вводом и выводом, что значительно снижает трудоемкость разработки, ввода и проверки модели, повышает наглядность процесса моделирования, позволяет проводить различные эксперименты с моделью, по ходу эксперимента изменять его условия и наблюдать за состоянием всех объектов и самой системы моделирования. Все это повышает эффективность обучения моделированию.

Рассматриваемая среда имитационного событийного моделирования дискретных систем ESimPL базируется на использовании событийных графов [3, 4] для описания процесса функционирования исследуемой системы.

Событийные модели представляют процесс функционирования исследуемой системы в терминах событий [5]. Выделяются два уровня представления событийных моделей: уровень математической модели – событийный граф, и уровень программной модели – в виде совокупности процедур макрособытий на языке программирования высокого уровня с использованием библиотеки поддержки имитационного моделирования, представляющей собой совокупность процедур и функций или классов на языке программирования модели. В связи с этим событийная система моделирования дис-

кретных систем включает два языка: язык визуального моделирования и язык программирования модели.

Для визуального представления событийных моделей в соответствии с подходом, изложенным в работе [5], были выделены графические и внутренние элементы модели.

Графические элементы составляют основу языка визуального событийного моделирования. Элементами модели, имеющими свои графические обозначения являются событие, условие, начало и окончание распараллеливания процесса и дуги четырех типов: мгновенного следования, следования с задержкой, мгновенной отмены и отмены события с задержкой [5]. Основным графический элемент модели – событие.

Внутренние элементы, не представляемые графически, – это статические и динамические объекты и переменные модели. Статическими объектами являются средства (каналы), очереди и ресурсы, динамическими объектами – процессы и активности. Каждому объекту ставится в соответствие два события изменения состояния: занятие и освобождение для статического объекта, начало и конец выполнения для динамического. Переменные разделяются на две разновидности: глобальные переменные модели и переменные процесса.

Языком программирования моделей среды ESimPL является язык высокого уровня C++, дополненный библиотекой поддержки имитационного моделирования. Язык моделирования ESimPL является развитием событийно-ориентированного языка SMPL [6] и разработан с использованием объектно-ориентированного подхода. Программная модель генерируется на языке C++, в тексте которой используются операторы языка ESimPL, реализованные в виде вызова методов граничного класса библиотеки поддержки имитационного моделирования. Язык моделирования определяется набором операторов, используемых при разработке программной модели.

Основу библиотеки составляют 7 классов, разделенных на 3 группы:

- граничный (интерфейсный) класс, реализующий функциональность языка моделирования, открытые методы данного класса определяют полный набор операторов языка; класс содержит в себе: списки регистрируемых в модели объектов (средств, очередей, ресурсов и процессов), переменную модельного времени, переменную текущего процесса, список запланированных и прошедших событий и многие другие параметры;
- классы, реализующие поведение статических и динамических объектов модели, накапливающие необходимые статистические данные эксперимента (результаты моделирования);
- вспомогательные классы, поля которых хранят информацию о постановке процессов в очереди и занятии ресурсов во время работы программной модели.

В состав операторов языка моделирования, реализованных в библиотеке поддержки имитационного моделирования, входят следующие группы операторов:

- операторы определения в модели статических объектов (средств, очередей, ресурсов);
- операторы изменения и проверки состояний статических объектов;
- операторы создания и удаления в модели динамических объектов (процессов);
- операторы работы с событиями (планирование, отмена и выбор очередного события из списка запланированных);
- операторы генерации псевдослучайных величин с вероятностными распределениями определенного вида (равномерное, экспоненциальное, треугольное);
- оператор генерирования отчёта по результатам моделирования.

Программные средства системы ESimPL включают CASE-средство разработки событийного графа дискретной системы, систему поддержки имитационного моделирования в виде библиотеки классов и шаблоны примеров с детальными пояснениями.

В CASE-средстве реализован оконный интерфейс для ввода, редактирования и удаления внутренних элементов модели (рис. 1). При вводе статических и динамических объектов среда автоматически генерирует события изменения состояний этих объектов, занося их в общий список. Данный список в дальнейшем используется для построения событийного графа. Введенные переменные модели используются для параметризации элементов графа на этапе его построения.

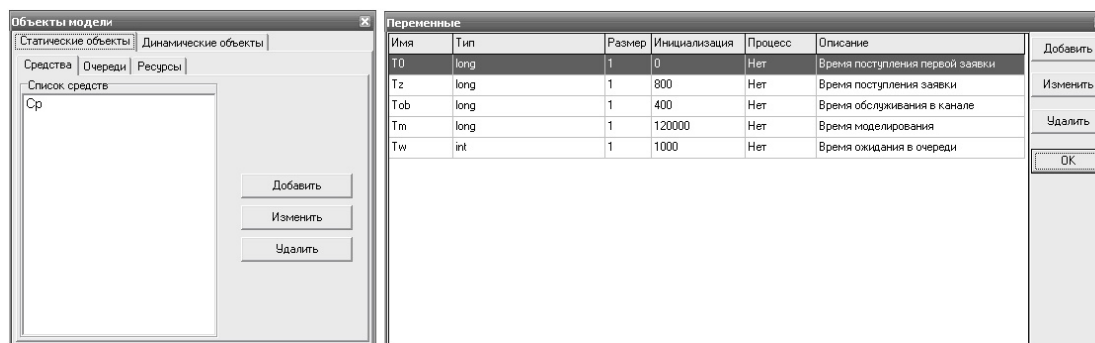


Рис. 1. Окна регистрации в модели внутренних элементов

Главное окно CASE-средства (рис. 2) предоставляет интерфейс разработчика, позволяющий в интерактивном режиме вводить и редактировать имитационный событийный граф. Кнопки боковой инструментальной панели соответствуют графическим элементам событийного графа и предназначены для выбора режима работы в рабочей области и ввода вершин и дуг событийного графа. В главном меню программного средства реализованы все необходимые операции над событийным графом. В число таких операций входит:

- проверка разрабатываемого событийного графа функционирования системы на соответствие правилам построения событийных графов и вывод ошибок;
- преобразование исходного событийного графа в программно-реализуемую форму (выделение макрособытий);
- проверка корректности программно-реализуемой формы графа с выделенными макрособытиями;
- настройка внешнего вида рабочей области и элементов событийного графа;
- сохранение разработанной модели в текстовый файл, содержащий описание модели на языке разметки XML, а так же загрузка модели из него;
- генерирование кода программной модели на языке программирования C++.

Проверка графа на соответствие правилам построения событийных графов осуществляется на различных этапах разработки модели: в процессе ввода вершин и дуг графа, после создания исходного событийного графа, после преобразования исходного событийного графа в программно-реализуемую форму графа с выделенными макрособытиями.

Формат XML, в котором сохраняются модели, является открытым и предоставляет возможность в текстовом редакторе просмотреть параметры сохраненной модели и производить их коррекцию.

Сгенерированная модель (рис. 3) может быть откорректирована разработчиком и сохранена в файле. Сохраненная модель в дальнейшем компилируется в среде программирования Borland C++ Builder. Скомпилированная модель позволяет выполнять прогон в режимах калибровки модели: режиме с выводом состояний всех статических объектов системы и режиме трассировки макрособытий и в режиме компьютерного эксперимента, в котором выводится только отчет о моделировании.

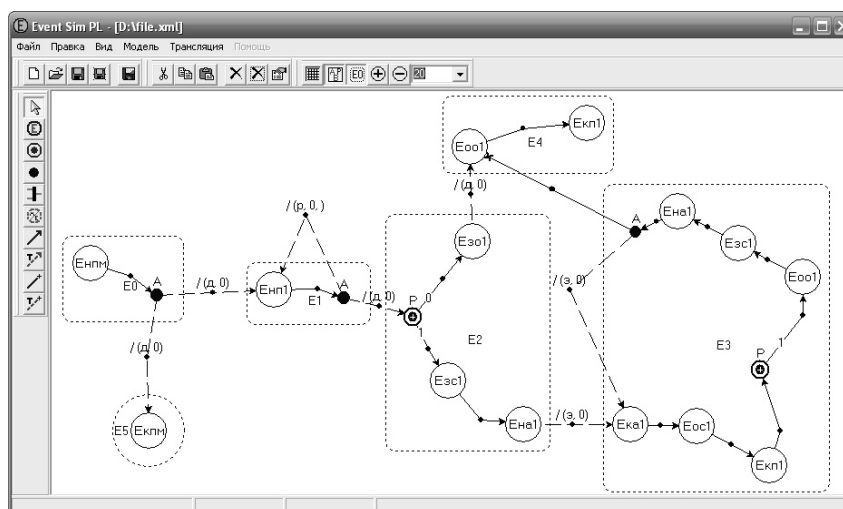


Рис. 2. Главное окно CASE-средства среды ESImPL

Использование среды ESimPL и ее библиотеки позволит:

- визуализировать а, следовательно, и сократить трудоемкость и время, процесса разработки событийных моделей;
- обучать описанию процессов поведения систем в терминах событий;
- сохранить доступность модели на программном уровне, что позволяет ее дорабатывать, изменять и, главное, обучать соответствию программной модели и событийной модели;
- программировать модель непосредственно на языке C++ с использованием библиотеки и выполнять прогоны;
- встраивать сгенерированную модель как элемент в другие программные продукты.

```

// Программная модель
Файл Правка

#include <iostream>
#include "Classmith.h"
class TUserProcess : public TProcess {
public:
    __fastcall TUserProcess(void); // конструктор класса процесса
};
__fastcall TUserProcess::TUserProcess(void) : TProcess()
{
};
// переменные пользователя
long T0=0; // Время поступления первой заявки
long Tz=800; // Время поступления заявки
long Tob=400; // Время обслуживания в канале
long Tm=120000; // Время моделирования
int Tw=1000; // Время ожидания в очереди

typedef TModel<TUserProcess> TUserModel; // Тип класса модели
TUserModel* mymodel; // Переменная класса модели
TUserProcess* current_process; // Переменная текущего процесса
int eventNumber; // Переменная текущего макрособытия

// Переменные статических объектов
Equip equip1; // переменная средства 'Cp'
Queue queue1; // переменная очереди 'Oч'

void E0(void)
{
    mymodel = new TUserModel();
    mymodel->printHeader();
    mymodel->printAndSetupOptions();

    equip1=mymodel->Create_equip("Cp"); // регистрация в модели средства 'Cp'
    queue1=mymodel->Create_queue("Oч",0,0); // регистрация в модели очереди 'Oч'

    mymodel->schedl(1,0,mymodel->Main_process);
    mymodel->schedl(5,0,mymodel->Main_process);
}

```

Рис. 3. Сгенерированная программная модель

Достоинствами среды ESimPL являются наглядное визуальное проектирование событийного алгоритма функционирования системы; использование для разработки программной модели объектно-ориентированного подхода; верификация разработанной модели на основе выдаваемых системой сообщений об исключительных ситуациях, возникающих в процессе моделирования; удобство представления результатов моделирования; небольшое время выполнения прогона программной модели. Внедрение и опыт эксплуатации среды в учебном практикуме по дисциплине «Компьютерное моделирование» для различных специальностей в вузе подтвердило ее эффективность.

Литература

1. **Кельтон В., Лоу А.** Имитационное моделирование. Классика. СПб.: Питер, 2004. 847 с.
2. **Савина О. А., Погорелов А. С.** Разработка высокоуровневой среды имитационного моделирования JaSim. // III Всероссийская научно-практическая конференция ИММОД-2007 / Сб. докладов. Т. I. СПб.: ЦНИИТС, 2007. С. 302 – 305.
3. **Schruben L. W.** Simulation Modeling with Event Graphs. // Communications of the ACM. 1983. Vol. 26. Num. 11. P. 957–963.
4. **Бабкин Е. А.** Событийные модели дискретных систем / Курск. гос. ун-т. Курск, 2005. 18 с. Деп. в ВИНТИ 14.01.05, № 30–В2005.
5. **Бабкин Е. А.** О синтезе событийных моделей дискретных систем // Ученые записки. Электронный научный журнал Курск. гос. ун-та, Эл № 77-26463, № 1, 2006. <http://www.scientific-notes.ru/pdf/s15.pdf>.
6. Автоматизация проектирования вычислительных систем. Языки, моделирование и базы данных / Под ред. М. Брейера. М.: Мир, 1979.

**ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ТРЕХМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Е. В. Березнев, Р. Н. Григорьев, Д. В.Самойлов, А. В. Слатин, А. А. Масленников
(Москва)**

Программное средство трехмерной визуализации предназначено для отображения движения и взаиморасположения больших совокупностей объектов различного назначения на фоне реалистичного отображения земной поверхности и небосвода. В программное средство трехмерной визуализации встроены средства анализа процессов функционирования, как выделенных пользователем объектов, так и всей совокупности объектов в целом.

Исходные данные для трехмерного отображения могут вырабатываться различными имитационными моделями или записываться в ходе натурных экспериментов. Передача исходных данных программному средству трехмерной визуализации может осуществляться через текстовые файлы результатов работы модели либо непосредственно в ходе работы модели по протоколу ТСР/ІР или через очередь событий операционной системы.

Программное средство трехмерной визуализации позволяет:

- Отображать необходимый участок земной поверхности.

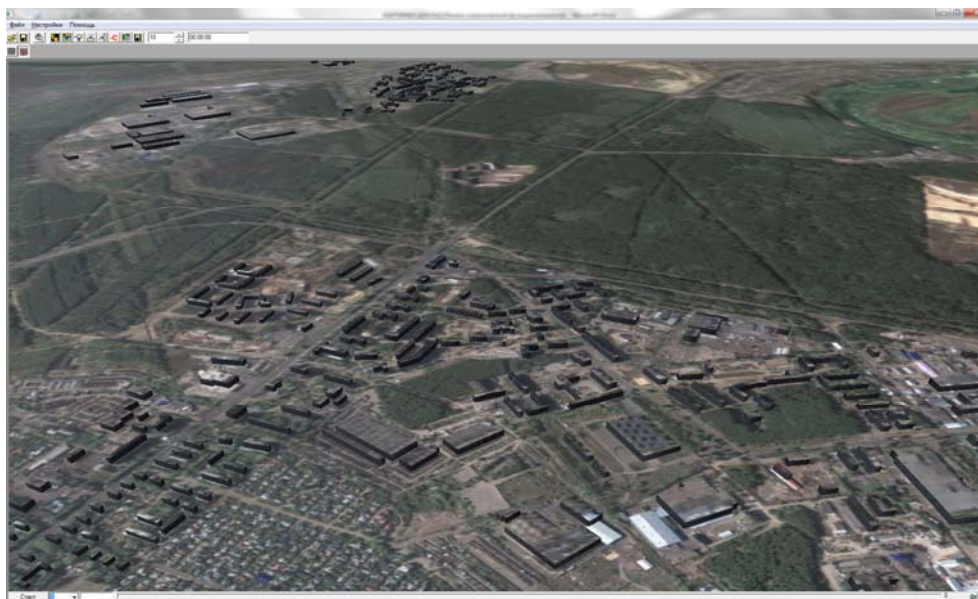


Рис. 1

- Перемещать камеру наблюдателя над всей отображаемой поверхностью Земли.
- Отображать в трехмерном пространстве положение и перемещение трехмерных образов моделируемых объектов:
 - образы единичных объектов – танков, БМП, БТР, орудий, САО, ПУ РСЗО, самолетов, вертолетов, транспортных средств общего назначения, объектов гражданской авиации т. д.;
 - значки групповых объектов: батальонов, рот, взводов, дивизионов, батарей, командных пунктов и т. д.
- Изменять масштаб отображения трехмерных образов объектов.
- Отображать изменение состояний объектов и связанных с ними процессов за счет изменения цвета их трехмерных образов.

- Отображать траектории движения моделируемых объектов.
- Для выбранных пользователем объектов отображать текстовую информацию о текущем их состоянии, а также осуществлять вывод текстового протокола, описывающего процесс функционирования объектов.
- Для выбранных пользователем объектов отображать зоны обнаружения и поражения.
- Воспроизводить ход операции с задаваемым исследователем временным масштабом: в реальном времени, при ускорении по отношению к реальному времени, при замедлении, а также останавливать воспроизведение, возвращаться назад по времени операции.
- Осуществлять быструю установку времени.
- Отображать тактические знаки, такие как линии боевого соприкосновения, линии разграничения подразделений, области размещения подразделений и т.д.
- Отображать иерархию подчиненности моделируемых объектов.
- Отображать воздушную обстановку полетов воздушных судов (элементы воздушного пространства (маршруты SID/STAR, ВТ, аэропорты), элементы структуры системы ОрВД (районные центры, секторы ОВД, запретные зоны)).

Трехмерная сцена, воспроизводимая программным средством трехмерной визуализации, представляет собой отображение моделируемых реальных пространственных объектов и процессов в компьютерно смоделированное трехмерное представление (виртуальную реальность), с помощью которого возможно оценить взаимное расположение и перемещение моделируемых объектов, при желании охватить целиком весь моделируемый процесс или, наоборот, сконцентрироваться на отдельных подробностях. Единичные объекты, находящиеся в сцене, отображаются трехмерными компьютерными моделями, передающими их основные конструктивные особенности. Такой способ отображения имеет преимущество перед способом отображения с использованием условных обозначений (значков) из-за своей естественности и наглядности – пользователь сразу узнает тип объекта, изображенного на экране, и ему не требуется заглядывать в справку, чтобы узнать, к какому типу средства относится данное условное обозначение.



Рис. 2

Поскольку моделируемые реальные объекты имеют очень небольшие размеры относительно того пространства, в котором они отображаются и взаимодействуют (например, дивизион ЗРК большой дальности действия, имеющий в своем составе порядка 24 средств размером в несколько метров, расположенных в круге радиусом 10 км, и имеющий зону поражения более 100 км, или для гражданской авиации перелет из одного конца России в другой), то их размеры при отображении могут масштабироваться в несколько десятков и сотен раз в сторону увеличения (до 1000). Объекты в сцене отображаются с наложенной на них текстурой (реальной раскраской, камуфляжем или др.), которую пользователь может отключить.

Для перемещения (навигации) по сцене используется понятие камеры. Центр камеры совпадает с позицией наблюдателя, а направление камеры – с направлением взгляда наблюдателя. Таким образом, перемещение наблюдателя в пространстве трехмерной сцены осуществляется перемещением и вращением камеры.

Для увеличения быстродействия для каждого объекта предусмотрены три уровня подробности. Когда камера находится далеко от объекта, то выбирается трехмерная модель объекта (далее модель) наименьшей подробности (может быть пустой моделью, т.е. ничего не отображается).

Элементы моделей могут двигаться для повышения реалистичности (например, поворот башен танков, вращение винтов вертолетов, вращение антенн РЛС и т. д.).

В программном средстве предусмотрен вывод дополнительной информации об объектах: как протокольных записей, так и фазовых координат. Протокольные записи несут в себе информацию о событиях, происходящих с объектами при моделировании.

В программе предусмотрено отображение траекторий движущихся объектов в виде линий, тянущихся за объектом от места его появления до текущего положения объекта.

В дополнение к траекториям в программном средстве существует возможность отображения вертикальных профилей полета объектов, которые позволяют в удобной форме оценить высотное расположение объектов.

В процессе моделирования объект принимает различные состояния, некоторые из которых могут отображаться цветом.

В качестве средства визуальной оценки расстояний в сцене используется координатная сетка с осями координат, а также присутствует инструментальный измерения расстояний между объектами.

Отображение возможно как в реальном масштабе времени, так и с коэффициентом по времени, большим или меньшим единицы. Коэффициент по времени больший единицы применяется при просмотре динамики в ускоренном режиме, а меньший единицы – в замедленном. При отображении динамики возможно перемещение по времени в произвольном направлении на произвольное время.

Модель земной поверхности построена на основании данных SRTM формата (для заданной широты/долготы берется высота), а в качестве текстуры – изображения из разнообразных источников, таких как Google Maps или Microsoft Virtual Earth. Текстура накладывается на построенный рельеф с помощью средств библиотеки OpenSceneGraph. Предварительно координаты преобразовываются в единую систему. Модель реализована системой уровней детализации (LOD) (в зависимости от удаления изменяется уровень подробности). Количество уровней выбирается исходя из рельефа (на более плоской поверхности меньше уровней). Для существующей модели есть возможность добавления объектов, представленных векторными данными (например, взятых из источников типа OpenStreetMap или ГИС Интеграция), таких как дороги, дома, леса, реки и т.д. Рельеф возможно подкрасить в необходимые цвета вместо текстуры.

Системы координат программного средства графической визуализации:

1. Прямоугольная декартова система координат, центр которой находится на поверхности Земли в выбранной пользователем точке.

2. WGS84.

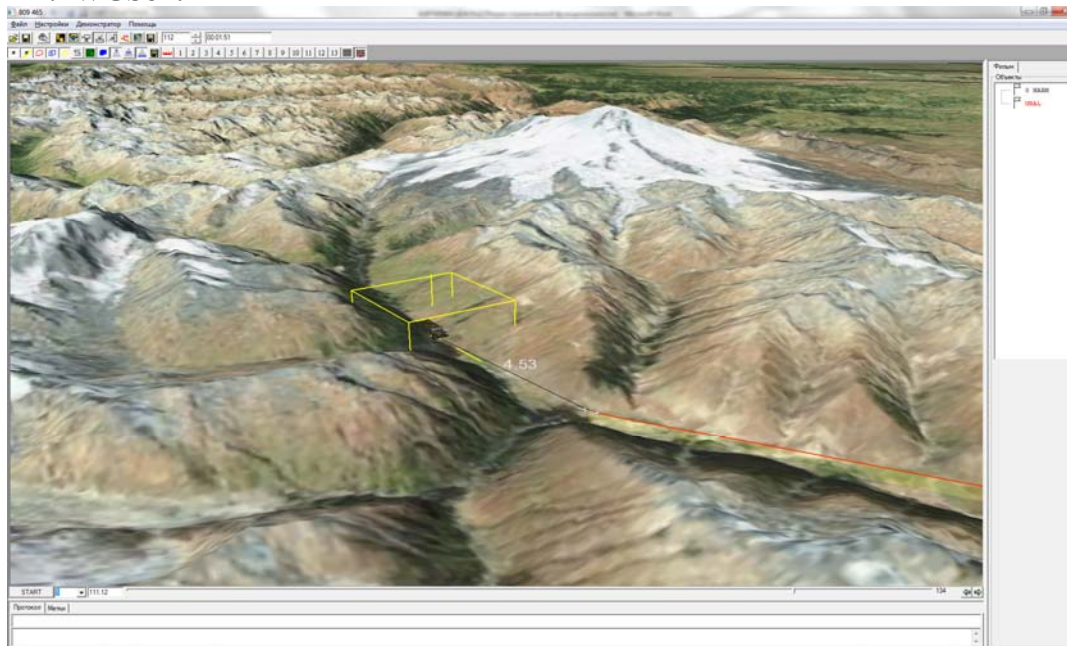


Рис. 3

Программное средство разработано с учетом возможности добавления дополнительных элементов среды, а также изменения ранее созданных компонентов под нужды каждой конкретной модели.

Для автоматизированной подготовки данных существует модуль подготовки сценариев, представляющий собой инструментарий расстановки средств на местности с редактированием их начального расположения, траекторий движения, программы поведения и т.д.

Программное средство трехмерной графической визуализации написано на языке C++ с использованием дополнительных библиотек wxWidgets и OpenSceneGraph.

Библиотека wxWidgets является переносной объектно-ориентированной библиотекой высокого уровня для создания интерфейса пользователя, имеет богатый набор компонентов, поддерживает множество компиляторов, проста в освоении, имеет открытые исходные коды и свободно распространяется по лицензии GPL.

OpenSceneGraph – это открытое программное обеспечение для разработки высокопроизводительных 3D-приложений, используемое разработчиками для таких приложений как:

- компьютерные игры;
- виртуальная реальность;
- научные приложения;
- компьютерное моделирование.

Инструментарий написан на C++ с использованием OpenGL и поддерживает большинство операционных систем: Windows, Mac OS X, Linux. Некоторые возможности библиотеки:

1. Поддержка OpenGL шейдеров.
2. Поддержка большого количества 2D изображений и 3D форматов, таких как OpenFlight, TerraPage, OBJ, 3DS, JPEG, PNG и GeoTIFF и т.д.
3. Крупный масштаб, поддержка создания всего глобуса отдельными страницами для ускорения загрузки.

4. Поддержка многопоточности и многопроцессорности.
5. Поддержка дополнительных постоянно пополняемых библиотек.

Доступность исходных кодов данных библиотек, возможность их компиляции, а также переносимость исходных кодов между различными платформами (Linux, Windows и т.д.) дают возможность использования программного средства трехмерной графической визуализации на различных операционных системах, в частности специализированных военных.

Программное средство трехмерной визуализации успешно применяется в ходе выполнения ряда НИР и ОКР, выполняемых по заданию Министерства обороны РФ.

В настоящее время программное средство трехмерной визуализации эксплуатируется:

- в составе стендов по отработке программного обеспечения образцов военной техники;
- в составе моделирующих комплексов по оценке эффективности функционирования различных систем военного назначения;
- в составе комплекса имитационного моделирования управления воздушным движением.

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АГЕНТНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В WEB

А. Ю. Гарбарев (Омск)

Введение

В настоящий момент существует большое количество систем имитационного моделирования, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Так, на кафедре АСОИУ Омского государственного технического университета существует лаборатория имитационного моделирования *imlab*, в которой разработаны такие системы, как *Simulab* и *SIMBIGRAPH*. Данные системы имеют ряд преимуществ по сравнению с существующими аналогами (*AnyLogic*, *RepastS*, *ASCAPE*, *NetLogo*) и вполне могут конкурировать на рынке имитационных систем. Однако развитие современного сетевого общества требует разработки веб-ориентированных интерфейсов для вовлечения как можно большего числа пользователей. В докладе обсуждается клиент-серверная система агентного моделирования *BridgeGL*, позволяющая реализовать функционал *SIMBIGRAPH* в веб.

Архитектура системы

Разработанная система состоит из трех частей: клиентское приложение, серверное приложение и подсистема моделирования (рис. 1). Клиентское приложение отвечает за взаимодействие с пользователем, а также за отображение процесса моделирования в браузере. Серверная часть отвечает за взаимодействие клиентской части с подсистемой моделирования. Подсистема моделирования выполняет модель, загруженную пользователем.

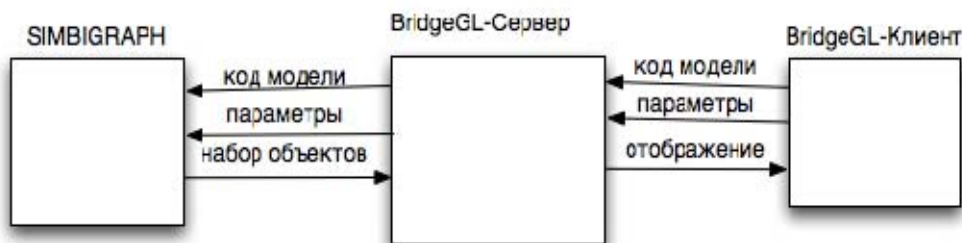


Рис. 1. Архитектура системы

Серверная часть

Серверная часть реализована на языке Java и представляет собой приложение с использованием сервлетов и страниц JSP. Серверная часть обеспечивает взаимодействие клиентской части с подсистемой моделирования, в частности управляет процессом моделирования, выполняет загрузку модели, предоставляет клиентской части состояние модели в текстовом формате.

Серверное приложение (рис. 2) состоит из подсистемы моделирования *Simulation*, пакета *BridgeGL-Server* и пакета *BridgeGL*. Когда пользователь выбирает агентную модель, пакет *BridgeGL-Server* инициализирует модель и запускает процесс моделирования. Запущенный процесс моделирования выполняется с помощью подсистемы моделирования *Simulation*. Пакет *BridgeGL*, получая объекты от подсистемы моделирования, преобразует их в текстовый формат, готовый для отображения на клиентской части. Затем, с определенным интервалом, пакет *BridgeGL* передает текстовое представле-

ние сцены в пакет BridgeGL-Server, после чего эти данные отправляются на клиентскую часть.

Клиентская часть

Клиентская часть представляет собой JavaScript приложение, которое с помощью технологии WebGL и библиотеки SceneJS отображает полученное с серверной части состояние модели в окне браузера.

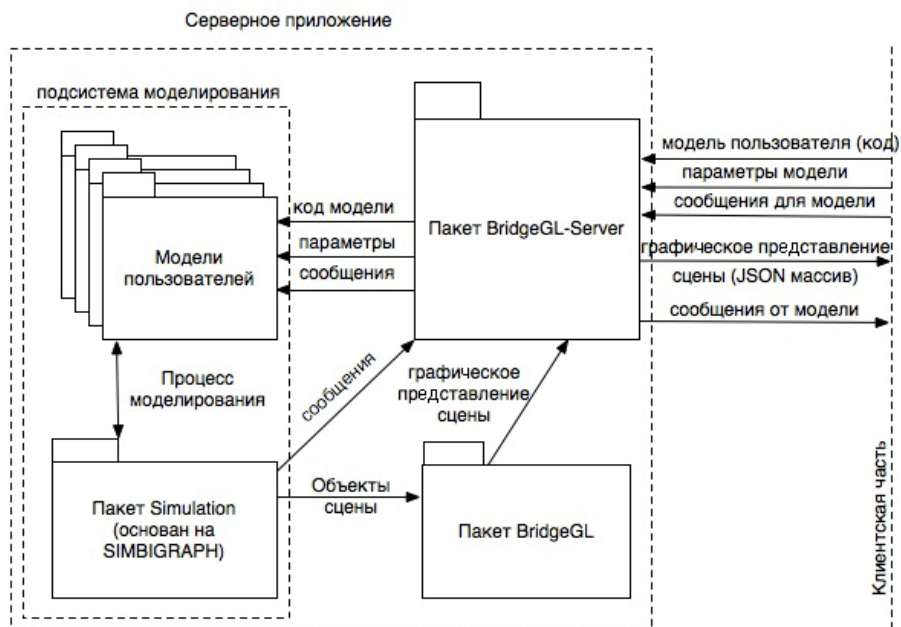


Рис. 2. Структура серверной части

Использование системы и направления развития

На рис. 3 представлен интерфейс пользовательской части. Клиентская часть позволяет работать с моделями, загруженными на сервер. В процессе работы пользователь может пошагово наблюдать процесс моделирования, изменять шаг и отслеживать информацию о текущем состоянии системы.

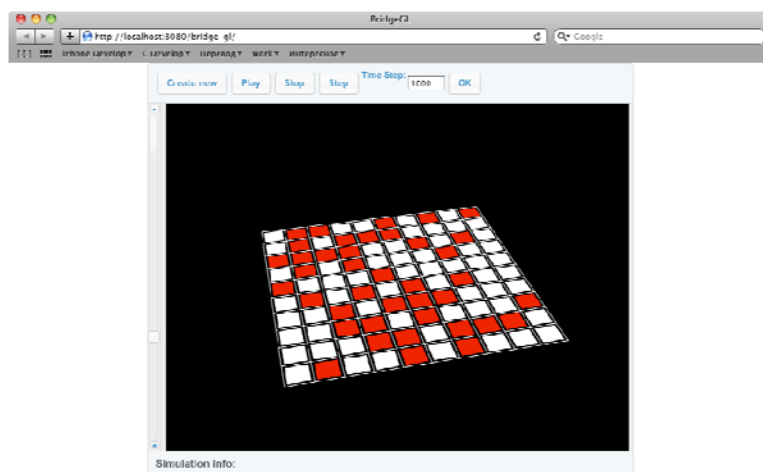


Рис. 3. Пользовательский интерфейс системы Bridge-GL

Рассмотрим программный интерфейс, позволяющий пользователям создавать модели. Пользовательская модель представляет собой исходный код, написанный на языке Java. Каждая модель должна наследоваться от класса *Simulation*, а значит, реализовывать методы: *initScene(ArrayList args)*, *performStep()*, *getStatistics()*.

Реализация игры «Жизнь» в BridgeGL показана на рис. 4.

```
public class GameOfLife extends Simulation {

    //Агента наследуем от BGLAgent
    //для того что бы он мог отображаться
    class Cell extends BGLAgent {

        //Реализация методов setState, getState
        //и storeState тривиальна

        public void step() {

            //Получаем соседей по Муту
            ArrayList neighbors = grid.getMooreNeighbors(this);

            //...
            //Считаем кол-во живых из соседей
            //...

            //2 правила игры "жизнь"
            if (state == AgentState.DEAD && count_of_live == 3) {
                setState(AgentState.LIFE);
                return;
            }
            if (state == AgentState.LIFE &&
                (count_of_live < 2 || count_of_live > 3)) {
                setState(AgentState.DEAD);
                return;
            }
        }
    }

    @Override
    public void initScene(ArrayList args) {

        //Создаем объект "решетка" размером 20 на 20
        grid = new BGLGrid(20, 1, 20, 5, 0, 5);

        scene.addNode(grid);

        //Добавляем агентов на решетку
        doStructure();
    }

    @Override
    public void performStep() {

        for (int i = 0; i < grid.size_x; i++)
            for (int j = 0; j < grid.size_z; j++)
                ((Cell) grid.getAt(i, 0, j)).storeState();

        for (int i = 0; i < grid.size_x; i++)
            for (int j = 0; j < grid.size_z; j++)
                ((Cell) grid.getAt(i, 0, j)).step();
    }

    @Override
    public String getStatistics() {

        //...
        //Получаем текущий шаг и кол-во живых клеток
        //
        return String.format("Шаг: %d Кол-во живых: %d", currentStep++, count);
    }
}
```

Рис. 4. Пример реализации игры «Жизнь Конвея»

Ключевым объектом в системе является объект *scene*. Любой объект, добавленный к объекту *scene* с помощью *addNode*, становится видимым пользователю. Цель метода *initScene* – создать объекты, задающие начальное положение модели, и добавить их в объект *scene*. Например, в реализации на рис. 4 создается объект решетки и добавляется на сцену. Рассмотрим задачу остальных методов: *getStatistics* – возвращает строку, которая будет отображена пользователю; *performStep* – вызывается с указанным

пользователем шагом и его цель – это изменение состояния модели, т.е. процесс моделирования. Класс *Cell* исполняет роль агента и имеет метод *step*, который, как видно в реализации, вызывает каждый шаг моделирования у каждого агента, что задает поведение агентов.

Как видно, создание модели максимально упрощено, что позволяет пользователям сосредоточиться на логике модели, а не на программной реализации.

В процессе эксплуатации системы выявлено узкое место в производительности системы – передача данных от сервера клиенту. Так, при работе с моделями, где количество агентов более 1600, быстродействие клиентской части снижалось. Это обусловлено обработкой сообщений большого объема. Для увеличения производительности в данный момент происходит портирование подсистемы моделирования на клиентское приложение, таким образом, при анимации не тратится время на формирование, передачу и обработку сообщений о каждом состоянии модели. Для получения непосредственного доступа к видеокarte решено отказаться от вспомогательных библиотек, таких как SceneJS, и работать напрямую с WebGL. В данный момент помимо реализации системы, обеспечивающей исполнение процесса моделирования на сервере, существуют наработки, где моделирование выполняется на стороне клиента [6].

Заключение

Разработана система агентного моделирования BridgeGL, обеспечивающая:

- загрузку и проведение имитационного моделирования удаленно (на сервере);
- визуализацию модели на стороне клиента (в браузере);
- эффективную реализацию моделирования клеточных автоматов.

На стороне сервера BridgeGL использует JavaEE технологии, на стороне клиента – технологии WebGL и SceneJS, взаимодействие клиент–сервер осуществляется посредством JSON массивов. В настоящее время ведется усовершенствование подсистемы, размещенной на стороне клиента, направленное на существенное увеличение производительности путем переноса части вычислений на сторону клиента [6].

Литература

1. **Ершов Е. С., Юдин Е. Б.** Система имитационного моделирования SIMULAB // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2009): Материалы 3 й всероссийской конференции. Т. 1. СПб: ЦТСС, 2009. С. 257–261.
2. **Юдин Е. Б.** Система агентного моделирования Simbigraph // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: Матер. III Всерос. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. Кн. 1. С. 312–316.
3. Сообщество WebGL. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://learningwebgl.com>, свободный. Яз. англ.
4. Черновая спецификация WebGL [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://cvs.khronos.org/svn/repos/registry/trunk/public/webgl/doc/spec/WebGL-spec.html>, свободный. Яз. англ.
5. Библиотека SceneJS [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.scenejs.org/>, свободный. Яз. англ.
6. **Гарбарев А. Ю.** Демонстрационные примеры – вычисление на клиентской части [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://alexgarbarev.homeunix.org/modeling>

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ РЕДАКТОР ФОРМ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ НА GPSS WORLD**В. В. Девятков, Ф. В. Исаев (Казань)**

Язык GPSS вот уже более 50 лет является одним из основных языков имитационного моделирования и широко используется по всему миру. Одной из наиболее распространенных его версий является GPSS World [1].

По сравнению с возможностями, предоставляемыми пользователю в современных системах имитационного моделирования (ИМ), GPSS World имеет минимум технологических средств создания моделей, их отладки и анализа результатов моделирования. В то же время функциональная мощь данного языка позволяет успешно конкурировать с современными средствами ИМ, а в некоторых случаях и превосходить их по качеству и мощности создаваемых моделей.

Для приближения технологий ввода исходных данных в созданные на GPSS World модели и анализа полученных результатов моделирования нами был создан универсальный редактор форм (далее – редактор). Редактор является примером САИИ для профессионалов ИМ [2]. Основные возможности, которые предоставляет пользователю редактор:

1. Построение визуально понятной и удобной формы ввода данных – формы, с помощью которой можно вносить исходные данные в текст модели, не изменяя вручную текст модели. Также можно наглядно оформить ввод данных надписями, рисунками и другими элементами документирования в соответствии с предметной областью модели и по желанию пользователя.

2. Построение формы динамики хода одиночного эксперимента. Данная форма позволяет с помощью графиков, диаграмм и диалоговых секций СЧА просматривать динамику хода эксперимента как во время моделирования, так и по его завершении.

3. Построение формы ввода серии экспериментов. Используя эту форму, пользователь задает факторы, показатели и план серии экспериментов. С помощью данного плана можно проводить серии экспериментов, в которых будут автоматически изменяться выбранные пользователем факторы и собираться значения указанных целевых показателей.

4. Сбор информации по СЧА объектов с помощью динамического мониторинга. Это позволяет более детально изучать динамику изменения объектов модели.

5. Комплексное документирование полученных результатов экспериментов и серий экспериментов с моделью в виде отчета в формате MS World, позволяющее пользователю по завершении исследования быстро составить результирующий отчет по проведенному ИМ.

6. Создание исполняемого EXE-модуля, который создается по составленным формам ввода данных и динамики хода эксперимента и имеет ту же функциональность, что и в самом редакторе форм. Данный модуль может запускаться отдельно от редактора и представляет собой отдельное имитационное приложение, которое в случае необходимости может быть передано заказчику.

Основное окно редактора показано на рис. 1. На нем изображен пример использования редактора для модели «Интермодальная железнодорожная ветка Аэропорт–Казань».

Для начала работы с редактором необходима только разработанная и полностью отлаженная GPSS модель, для которой и будут разрабатываться диалоговые формы. Перед использованием модели в редакторе ее надо сохранить в формате TXT, проводя при этом небольшие изменения в модели:

- убрать или закомментировать блок управления временем, так как управление временем моделирования осуществляется подсистемой динамического мониторинга в самом редакторе;

- исключить косвенную адресацию, где это возможно, так как сбор данных динамическим мониторингом по косвенной адресации пока не реализован. В следующей версии редактора это ограничение будет снято.

Также, если будет использоваться студенческая версия GPSS World, нужно обратить внимание на количество блоков в модели, поскольку при использовании динамического мониторинга будут автоматически генерироваться блоки PLUS на каждый объект, по которому будет собираться статистика, а также еще несколько блоков для образования цикла мониторинга и сегмента управления временем моделирования. В общей сложности подсистема динамического мониторинга будет расширять модель минимум на 8 блоков (как правило, это 20–30 блоков).

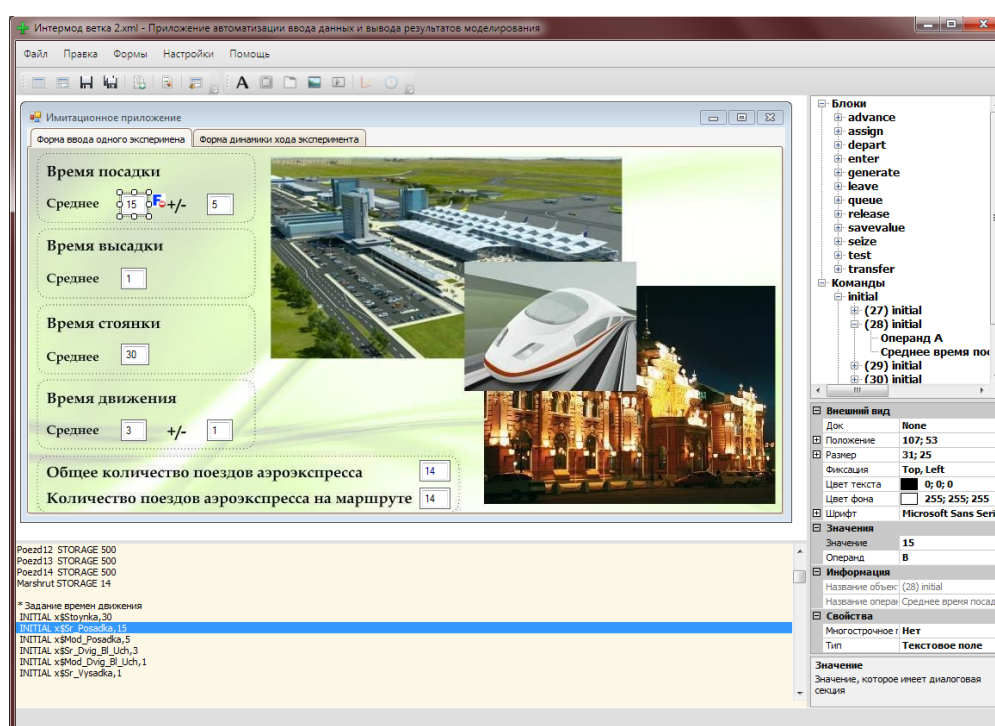


Рис. 1. Главное окно универсального редактора форм

При запуске редактора пользователь указывает модель, с которой он будет работать. После добавления модели редактор форм осуществит синтаксический анализ текста модели в двух направлениях: вычлениются отдельные команды и блоки и определяются все объекты, по которым можно собирать динамический мониторинг. В результате работы анализатора происходит заполнение двух деревьев: дерева операторов модели и дерева объектов модели (рис. 2).

В дереве операторов сгруппированы все блоки и команды, найденные в тексте модели, а в дереве объектов – все объекты. Любые элементы этих деревьев (поля команд и блоков, соответствующие объектам GPSS СЧА) можно именовать для большей наглядности и использования в будущем при проведении экспериментов и анализе результатов.

С помощью специальных инструментов и команд, доступных на форме ввода и дерева операторов модели, можно создать полнофункциональную, удобную и презентабельную форму ввода исходных данных. А с помощью инструментов и команд, дос-

тупных на форме вывода и дерева объектов модели, – форму хода динамики экспериментов.

Также пользователь может создать форму проведения серии экспериментов. Для этого необходимо указать факторы, целевые показатели и построить план проведения серии экспериментов (рис. 3).

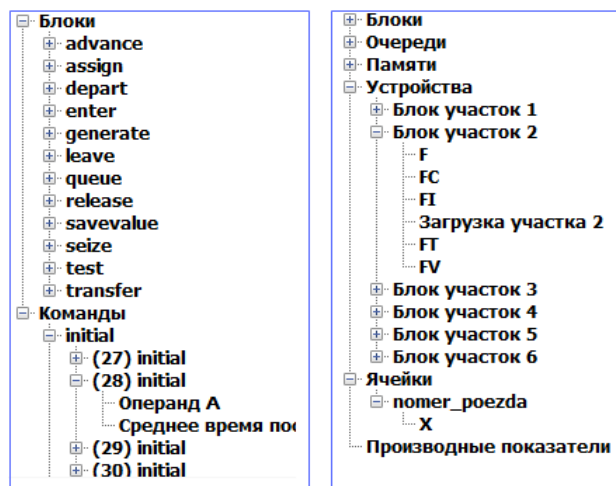


Рис. 2. Дерево операторов справа, дерево объектов слева

	Название	Псевдоним	Операнд	Значение по умолчанию	Участствует в эксперименте
▶	Количество поез...	marshrut	Операнд А	14	☒
	Время стоянки	(27) initial	Операнд В	30	☐
	Среднее время п...	(28) initial	Операнд В	15	☐
	Модификатор вр...	(29) initial	Операнд В	5	☐
	Среднее время д...	(30) initial	Операнд В	3	☐
	Модификатор вр...	(31) initial	Операнд В	1	☐
	Среднее время в...	(32) initial	Операнд В	1	☐

Рис. 3. Форма ввода серии экспериментов

После построения форм, необходимо указать информацию о модели: название и основные цели исследования, период моделирования, единицу модельного времени, а также настроить динамический мониторинг, в котором надо указать те СЧА объектов, которые понадобятся для анализа результатов.

После осуществления всех настроек пользователь может начинать проводить исследования, запуская одиночные эксперименты или их серии (рис. 4). При этом можно наблюдать динамику изменения показателей. В представленном примере это зеленые и красные прямоугольники, показывающие занятость железнодорожного пути поездом.

При завершении моделирования отображается окно результатов (рис. 5).

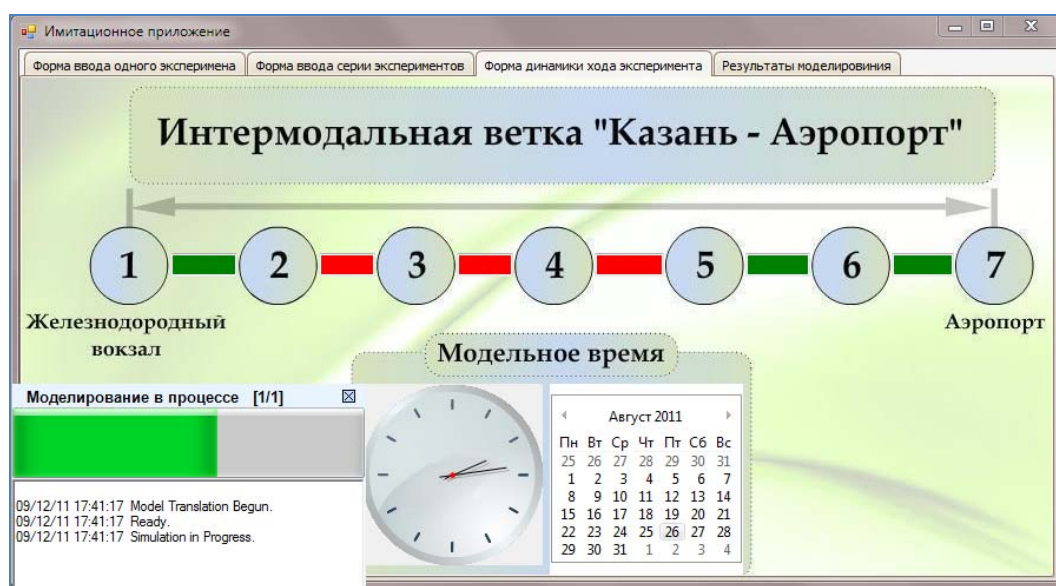


Рис. 4. Проведение моделирования

В нем можно просмотреть основную информацию по модели, таблицу результатов, графики зависимости целевых показателей от факторов, распечатать необходимые данные, просмотреть результаты серий экспериментов и отдельных экспериментов, произвести оптимизацию (на базе результатов серии экспериментов) для нахождения наилучшего решения.

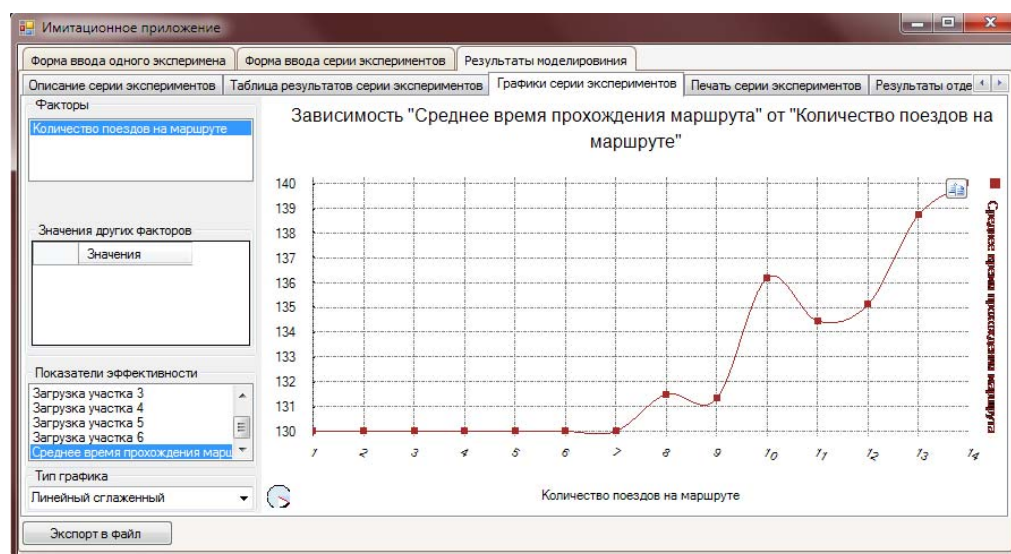


Рис. 5. График результатов серии экспериментов

Результаты отдельного эксперимента включают в себя:

- общую информацию по эксперименту;
- текст модели с использованными в данном эксперименте исходными данными;
- исходные данные, которые введены пользователем в форме ввода;
- ролик динамики эксперимента, используя который можно исследовать интересный отрезок времени;
- динамику отдельных показателей, собираемых при моделировании (рис. 6);
- стандартный отчет GPSS и его русифицированный аналог.

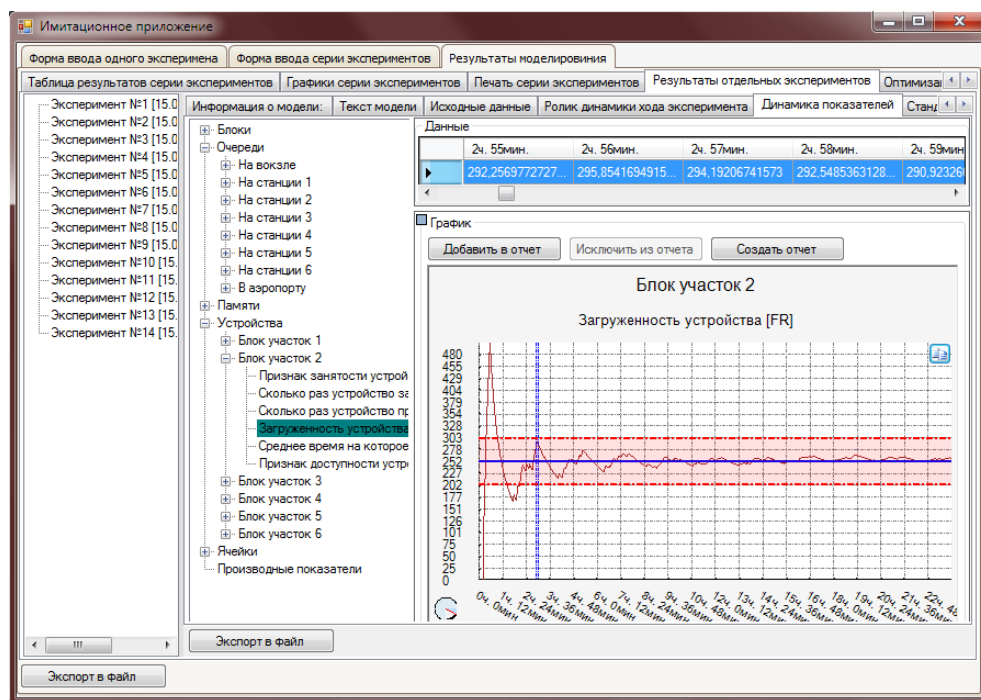


Рис. 6. Результаты одиночного эксперимента

После изучения и анализа полученных результатов экспериментов или их серий, можно необходимые для документирования данные занести в отчет и продолжить исследования. Пополняемый таким образом виртуальный отчет результатов исследования модели в конечном итоге может стать основой итогового отчета, который в любом случае готовит пользователь по результатам исследования. Таким образом, в редакторе автоматизируется еще один этап имитационного исследования – документирование результатов.

Также можно создать исполняемый EXE-модуль, который содержит все построенные формы и готов к проведению исследований, без необходимости запускать сам редактор форм. Таким способом можно отделить саму разработку от полученного инструмента исследования для конкретной модели и конкретного заказчика.

В результате редактор, не смотря на некоторые ограничения, позволяет дополнительно автоматизировать несколько этапов имитационного исследования, существенно упростить ввод данных в модель и анализ результатов, сделать эти диалоги доступными и наглядными для пользователя или Заказчика данной модели.

Литература

1. Руководство пользователя по GPSS World. Пер. с английского, Казань: Мастер-Лайн, 2002.
2. Девятков Т. В. Некоторые вопросы создания систем автоматизации имитационных исследований // Прикладная информатика. 2010. № 5(29). С 102–116.

РАСШИРЕННЫЙ РЕДАКТОР GPSS WORLD**В. В. Девятков, М. В. Федотов (Казань)****Введение**

В настоящее время специалисты, занимающиеся разработкой имитационных моделей на языке GPSS World, используют стандартный редактор, предлагаемый разработчиком Minuteman Software [1], [2]. Он имеет неплохие инструменты отладки и отслеживания состояния объектов моделирования, однако средства создания и редактирования моделей оставляют желать лучшего. Например, в нём отсутствуют возможности по управлению моделями и экспериментами, текстовый редактор примитивен, отсутствуют иерархическое и графическое представления модели, нет средств документирования результатов исследований и т.д. Данный редактор был хорош 10–15 лет назад, но современные информационные технологии ушли далеко вперед. Другие языки и системы имитационного моделирования (например, [3]) имеют существенно более развитые средства создания, отладки и исполнения моделей.

Для устранения этих проблем был создан расширенный редактор имитационных моделей, представляемый в этой статье. Он рассчитан как на профессиональных разработчиков имитационных моделей на языке GPSS World, так на начинающих пользователей. С его помощью можно:

1. Организовать модели, эксперименты и результаты исследований в библиотеке в соответствии со структурой, которая вам привычна и удобна.
2. Написать модель в новом текстовом редакторе, который поддерживает: выравнивание, подсветку синтаксиса, контекстную подсказку, обнаружение ошибок в операторах, группировку и ряд других средств автоматизации ввода.
3. Сконструировать модель с использованием графического редактора схем. Определить логически независимые участки кода (типовые элементы) и сохранить их в библиотеке, чтобы в будущем не переписывать код. Объединить их в схему или даже создать многоуровневую схему, если этого требует ваша задача. И поручить программе сборку модели.
4. Выполнить одиночную модель или определить изменяемые факторы, чтобы программа сформировала серию экспериментов и показала работу модели в динамике.
5. Сохранить данные экспериментов и полученные результаты.
6. Сформировать и распечатать документ в формате Microsoft Word, который будет содержать все данные и описания моделей, экспериментов и схем, и результаты моделирования.
7. Создать автоформу, и превратить вашу обособленную модель в полноценное Windows приложение с полями ввода, вывода и управляющими элементами для гибкой и удобной работы с ней.

Необходимо отметить, что новые возможности никоим образом не изменяют спецификации языка. Тексты моделей GPSS World, написанные вами ранее, будут полностью совместимы с новым редактором, и наоборот. Другим важным моментом является тот факт, что расширенный редактор использует для запуска моделирования средства стандартного редактора GPSS World, а потому его наличие обязательно (в сети или на локальном компьютере), если вы собираетесь не только писать, но и выполнять модели.

Основные возможности нового текстового редактора

Рассмотрим работу редактора более подробно. Для хранения и быстрого доступа к моделям используется библиотека моделей. Она представляет собой иерархическое дерево, в котором можно определять категории для хранения файлов текущих проек-

тов, архивные или временные категории, а также модели, текстовые файлы, файлы схем, формы ввода, формы вывода, исполняемые файлы оформленных моделей. С точки зрения операционной системы, библиотека представляет собой набор папок и файлов, поэтому можно без труда подключить к программе ваши текущие модели. Внешний вид библиотеки моделей представлен на рис. 1.

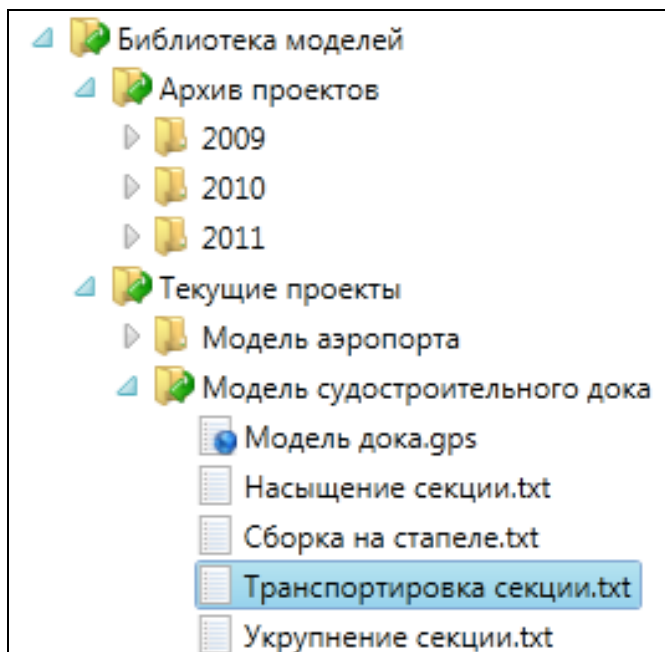


Рис. 1. Библиотека моделей

Для того, чтобы начать редактирование модели, необходимо выбрать её в библиотеке и дважды кликнуть по ней левой кнопкой мыши. Текст модели откроется во вкладке (рис. 2).

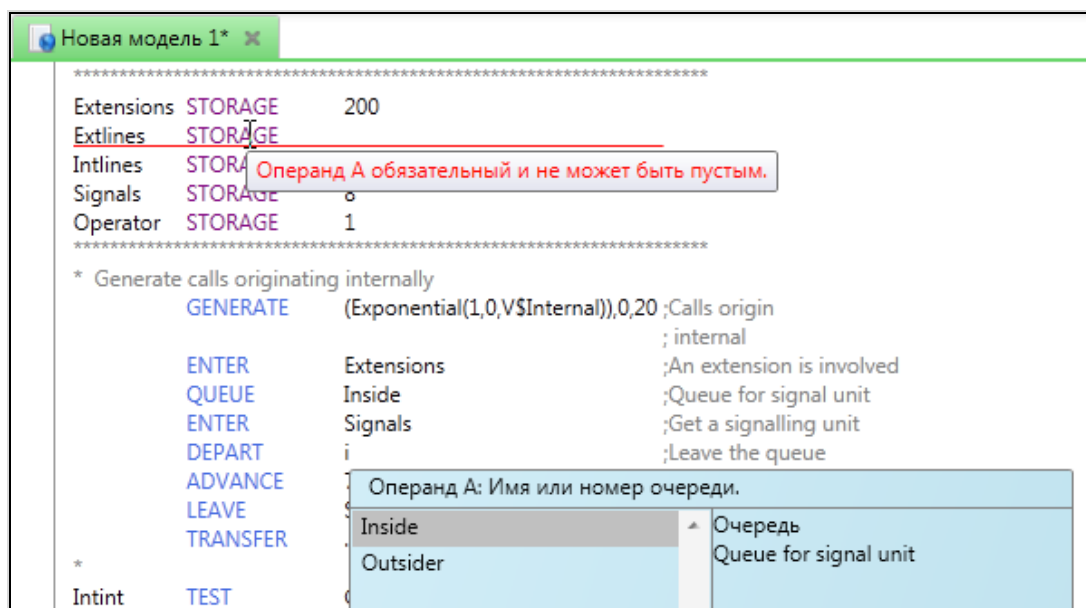


Рис. 2. Вкладка с моделью

Все модели и связанные файлы будут открываться во вкладках, что позволит вам быстро переключаться между ними. Вкладки можно перемещать относительно друг друга для группировки.

Как можно заметить на рис. 2, программа автоматически выравнивает операторы, аргументы и комментарии по условным линиям. Если посмотреть на 3-ю строку модели, то увидите, что она подчеркнута (красным цветом). Так программа сообщает, что в данном операторе обнаружена ошибка. Если навести на эту строку указатель мыши, то высветится подсказка и можно будет понять, какие же ошибки обнаружила программа. Чуть ниже на рис. 2 показана контекстная подсказка. Она возникает при вводе оператора или операнда и отображает список подходящих по контексту объектов (наименований блоков, операторов, памяти, устройств, ячеек и т.п.) и либо стандартное описание, либо описание, которое вы им дали в модели. В редакторе – команды, блоки, операнды, строки и комментарии выделяются различным цветом, что повышает наглядность кода. Редактор содержит средства автоматизации ввода и поиска, такие как:

- быстрый ввод операторов и блоков (по контекстным подсказкам);
- оперативное формирование функций пользователя (по таблице или графику);
- подключение внешнего файла – генерацией оператора INCLUDE и связи с файловой системой;
- различные переходы к блоку по метке в операнде по номеру строки, по ошибке из журнала, отмена и возврат выполненных действий и т.п.

Графический редактор схем модели

В крупных проектах не всегда удаётся с самого начала определиться с сегментами и объектами модели, а также с циклами моделирования. Такие проекты целесообразно разрабатывать, разделяя модель на логически независимые части и устанавливая между ними связи посредством интерфейсов. Для этого создан графический редактор схем. Основой схемы является типовой элементарный блок (ТЭБ). Данный элемент является, по сути, чёрным ящиком для остальных ТЭБ. Он обладает интерфейсом, т. е. набором входов и выходов, с помощью которых он взаимодействует с другими элементами. ТЭБ бывают двух типов:

1. Первый тип является минимальной неделимой частью схемы. Помимо входов и выходов он содержит код модели на языке GPSS World, которая задаёт его поведение. Входы и выходы такого ТЭБ являются, по сути, метками операторов модели, а значения ячеек и матриц определяют состояние ТЭБ.

2. Второй тип является уровнем декомпозиции, т. е. содержит в себе набор взаимосвязанных ТЭБ и не имеет собственного GPSS описания. Входы и выходы играют лишь роль передаточных механизмов. Таких уровней декомпозиции в схеме может быть неограниченное количество, что позволит вам сформировать необходимую иерархическую структуру.

Пример схемы, представлен на рис. 3. На схеме – синими прямоугольниками показаны элементарные блоки, а серыми – схемы (уровни декомпозиции).

Входы и выходы ТЭБ соединяются посредством связей. Учитывая, что входы и выходы элементарных ТЭБ – метки операторов, связи можно представить как безусловные переходы между операторами. Пользователю не нужно заботиться о написании операторов перехода, программа сформирует их самостоятельно. Также не нужно заботиться о совпадении имен различных ТЭБ. Программа при необходимости скорректирует имена для предотвращения конфликтов.

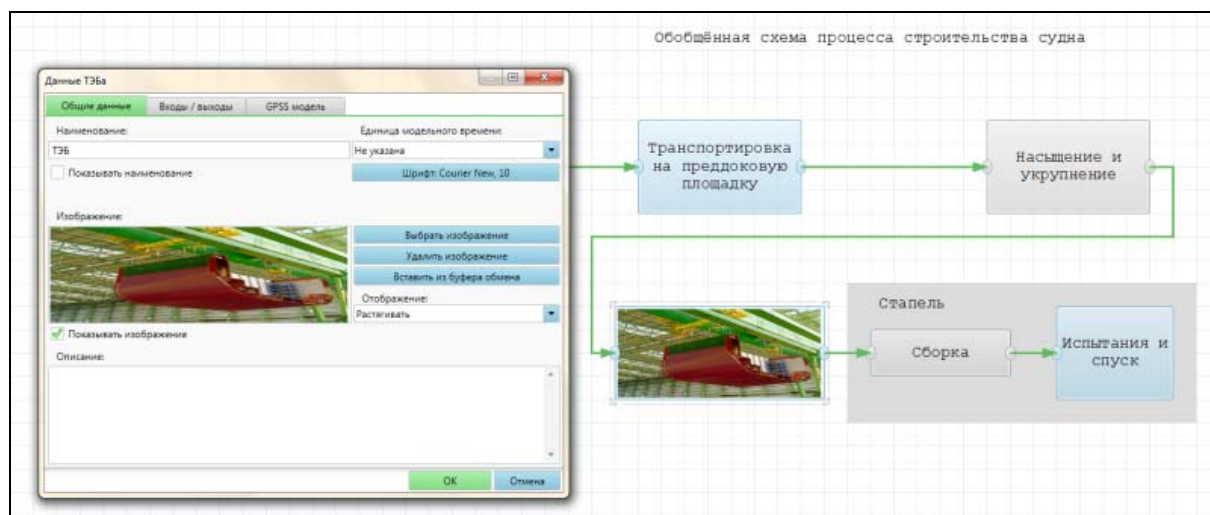


Рис. 3. Пример схемы модели

Если модель разрабатывается «снизу вверх», необходимо сначала определиться с элементами, а только потом переходить к более высоким уровням (схеме). Для хранения ТЭБ в редакторе предусмотрена библиотека. Можно создать новый элемент в библиотеке или импортировать его из любой созданной ранее схемы. ТЭБ в этой библиотеке можно группировать с помощью категорий. Создав экземпляр элемента из библиотеки ТЭБ, вы получите полностью автономный объект, никак не связанный с библиотекой. Другими словами – изменение ТЭБ в библиотеке не отразится на его экземплярах.

Для наглядности, на ТЭБ можно поместить картинку или текст. Такие же элементы оформления доступны и для всей схемы. Пример оформления приведен на рис. 3.

Схему можно сохранить и впоследствии создать на её основе GPSS модель.

Дополнительные средства исполнения и отладки моделей

Для прогона модели в программе имеются специальные средства. Запуск модели отмечается появлением задачи в очереди моделирования, расположенной в правой части окна. После трансляции модели можно выполнить дополнительные команды, как и в стандартном редакторе GPSS World.

В программу можно встроить дополнение – универсальный редактор форм, который может использоваться и автономно. С его помощью вы сможете создать специальные формы для модели (диалоги ввода исходных данных в модель и вывода результатов моделирования). Затем можно создать исполняемый модуль для модели и провести имитационное исследование с его помощью. Такой вариант представления модели очень удобен при сдаче и оформлении учебной работы (лабораторной, курсовой, диплома) или практической модели заказчику.

В расширенном редакторе GPSS World имеются дополнительные инструменты отладки модели. Пример работы программы в режиме отладки показан на рис. 4. В процессе отладки можно отследить изменения тех или иных ячеек, матриц или параметров для того, чтобы найти ошибку или отклонение в работе модели. Отладка в редакторе представляет собой трассировку, т. е. осуществляется после выполнения модели, а не в процессе работы. Это означает невозможность изменять значения переменных в процессе отладки.

При трассировке текущий оператор подсвечивается (жёлтым цветом). Кроме того, пользователю доступны значения всех ячеек и параметров транзактов, которые были сформированы к определённому моменту.

The screenshot displays the GPSS World debugger. On the left, a list of model blocks is shown, including test, savevalue, and transfer blocks. On the right, a monitoring panel provides real-time data:

- Time (AC1):** 2300
- Transaction (XN1):** 420
- Parameters Table:**

Параметр	Значение
identifier	1
vesselIdentifier	1
length	8.1
width	5.7
- Variables Table:**

Величина	Тип	Значение
stapel_label_for_vessel	Ячейка	0
min_pos_for_cur_stape	Ячейка	5.2
cur_amount_stapels_fa	Ячейка	4
- Matrices:** A section for monitoring matrix data.

Рис. 4. Отладка (трассировка) модели

Пользователь может ограничить область трассировки и выбрать необходимую ему последовательность операторов модели. Имеется также возможность поиска определённого транзакта в модели по номеру или значению его параметра и отслеживания только его передвижения в модели.

В процессе отладки пользователь может двигаться как вперёд, в прямой последовательности блоков, так и в обратном направлении.

Если при создании и отладке модели вам понадобятся средства стандартного редактора GPSS World, то они доступны в полном объеме и их можно вызвать непосредственно в процессе работы.

Заключение

Расширенный редактор имитационных моделей на языке GPSS World – это принципиально новый программный инструмент для профессиональных разработчиков моделей, позволяющий более эффективно решать задачи в области проектирования и отладки имитационных моделей. Функционально он охватывает практически все этапы имитационного исследования – постановки задачи, создания и написания моделей, их отладки, планирования и проведения экспериментов, анализа и документирования результатов исследования.

Литература

1. Руководство пользователя по GPSS World / Пер. с англ., Казань: Мастер-Лайн, 2002. 383 с.
2. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World. Учебное пособие. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 368 с.
3. Официальный сайт компании Экс-Джей Текнолоджис – www.xjtek.com

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С ЦЕЛЬЮ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ**М. В. Жуков, В. В. Золотухин (Красноярск)**

Спутниковая связь представляет собой особый вид беспроводной связи, доступный даже в тех регионах Российской Федерации, где отсутствует возможность прокладки кабелей связи, а других операторов услуг беспроводной связи поблизости нет. Особенно актуальным является использование систем спутниковой связи в северных регионах, а также в труднодоступной местности, где подобные системы остаются единственным видом связи. Естественно, в таких случаях следует уделять особое внимание качеству функционирования подобных систем, в частности их устойчивости, живучести и надежности.

Согласно ГОСТ Р 53111 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки» функционирование систем связи определяется таким комплексным свойством, как устойчивость, под которой подразумевается способность сети электросвязи выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в результате воздействия внутренних и внешних дестабилизирующих факторов. При этом свойство устойчивости можно разделить на два более простых свойства – надежность и живучесть. Под надежностью понимается способность сети связи сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях воздействия внутренних дестабилизирующих факторов, а под живучестью – в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов.

Сеть спутниковой связи включает в себя наземную и спутниковую часть: наземная часть представляет собой оборудование на стороне провайдера и множество абонентских спутниковых станций, а спутниковая часть представлена одним из спутников, находящихся на геостационарной орбите (рис. 1). В состав абонентской спутниковой станции входят: антенная система, передатчик, приемник (малошумящий усилитель – МШУ), модем, мультиплексор и оборудование клиента.

В процессе обработки собранной статистики по отказам оборудования систем спутниковой связи авторами данной работы были выделены следующие основные причины отказов в предоставлении услуг связи:

- отказ аппаратной части оборудования;
- зависание оборудования (отказ программного обеспечения);
- плохие погодные условия;
- другие причины.

Отказ аппаратного и программного обеспечения, а также отключение электропитания можно отнести к внутренним дестабилизирующим факторам, в то время как плохие погодные условия – к внешним. Плохие погодные условия влияют на уровень сигнала (работоспособное состояние сохраняется до тех пор, пока отношение сигнал/шум составляет не менее 3–4 дБ), а также в некоторых случаях способны «увести антенну». Категория «другие причины отказов» представляет собой достаточно обширную группу, включающую в себя такие причины отказов, как проблемы на стороне абонента, проблемы со стороны провайдера или транзитных операторов и др.

Для дальнейшего упрощения изложения в качестве комплексного понятия будем использовать термин «надежность» как более привычный для понимания, подразумевая при этом воздействие как внешних, так и внутренних дестабилизирующих факторов.

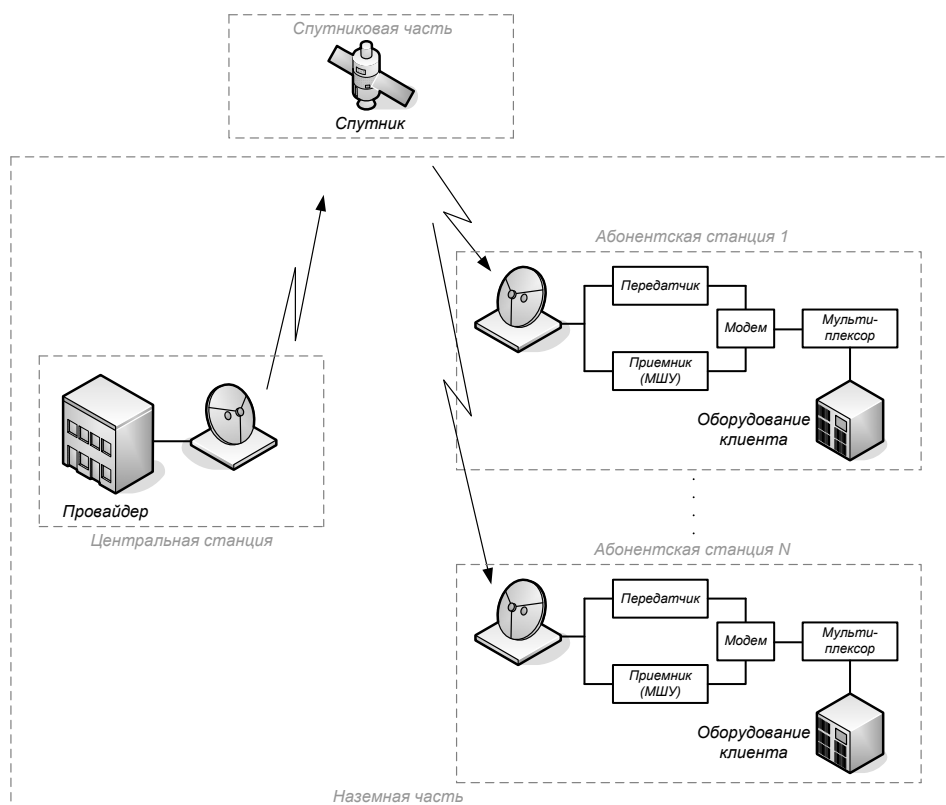


Рис. 1. Структурная схема сети спутниковой связи

В результате проведенного анализа была предложена математическая модель функционирования системы спутниковой связи в виде диаграммы состояний (state chart) (рис. 2).

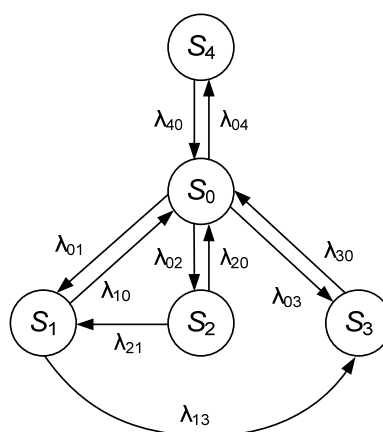


Рис. 2. Диаграмма состояний системы спутниковой связи

На данной диаграмме используются следующие обозначения возможных состояний системы спутниковой связи:

- S_0 – работоспособное состояние системы спутниковой связи;
- S_1 – отключение электричества или «скачки» питающего напряжения;
- S_2 – плохие погодные условия, «увело» антенну;
- S_3 – отказ программного обеспечения («зависание» оборудования);
- S_4 – другое (прочие причины отказа).

Интенсивности перехода между состояниями определялись на основе анализа собранной статистики с помощью программной системы мониторинга состояния сети

Zabbix. Данная система позволяет не только получать данные о времени возникновения и продолжительности отказов, но фиксировать в журнале событий их вид (причину). В частности, интенсивность отказов по причине отключения электропитания (интенсивность переходов λ_{01}) рассчитывалась по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{N_{\text{отк.}}}{S_{\text{станц.}} T}, \quad (1)$$

где $N_{\text{откл.э.п.}}$ – количество случаев отключения электропитания за некоторый период времени T ;

$S_{\text{станц.}}$ – общее количество станций спутниковой связи в исследуемом районе;

T – период времени, в течение которого проводился сбор и анализ статистических данных (8760 ч).

Интенсивности восстановления λ_{10} , λ_{20} , λ_{30} и λ_{40} представляют собой постоянные величины, значение которых определяется временем на выезд ремонтной бригады (если необходим) и непосредственно устранение неисправности и составляет от 0,25 до 6 ч.

Первоначально математическое моделирование функционирования системы спутниковой связи осуществлялось с использованием математического аппарата цепей Маркова, однако при этом неизбежно возникает ряд ограничений, в частности, результаты, полученные при использовании марковских случайных процессов справедливы только при наличии нескольких ремонтных бригад. В противном случае время ремонта будет в значительной степени зависеть от числа одновременно возникающих отказов, поскольку процесс устранения всех предыдущих отказов оказывает непосредственное влияние на время устранения текущего отказа, и, как следствие, результаты оказываются менее точными. Многие авторы, например [1], утверждают о нецелесообразности использования цепей Маркова с целью анализа надежности современных систем. В случае же имитационного моделирования появляется возможность изменять время обслуживания динамически, в процессе моделирования, в зависимости от ряда факторов.

На основе предложенной математической модели была разработана динамическая дискретно-событийная имитационная модель в среде AnyLogic, представленная на рис. 3. Функционирование данной модели заключается в последовательном переходе из одного состояния в другое в соответствии с математической моделью, приведенной на рис. 2, причем интенсивности перехода определяются либо расчетным путем (в случае исследования показателей надежности для конкретной системы спутниковой связи), либо автоматически в случае оптимизации структурного резервирования системы.

Для хранения изменяющихся числовых значений и сбора статистических данных используются специальные объекты AnyLogic – переменные. В частности, для сбора статистики по коэффициенту готовности системы используется объект типа «переменная», которая изменяется в каждом блоке в зависимости от работоспособности конкретного состояния, после чего новое значение обрабатывается блоком сбора статистики AvailabilityStats:

availability = 0;

AvailabilityStats.add(availability, time());

Помимо исследования показателей надежности функционирования системы спутниковой связи преследовалась цель выбора оптимального варианта резервирования, позволяющего при минимальных затратах на модернизацию сети связи достичь требуемых показателей надежности, а также максимальной прибыли оператора связи.

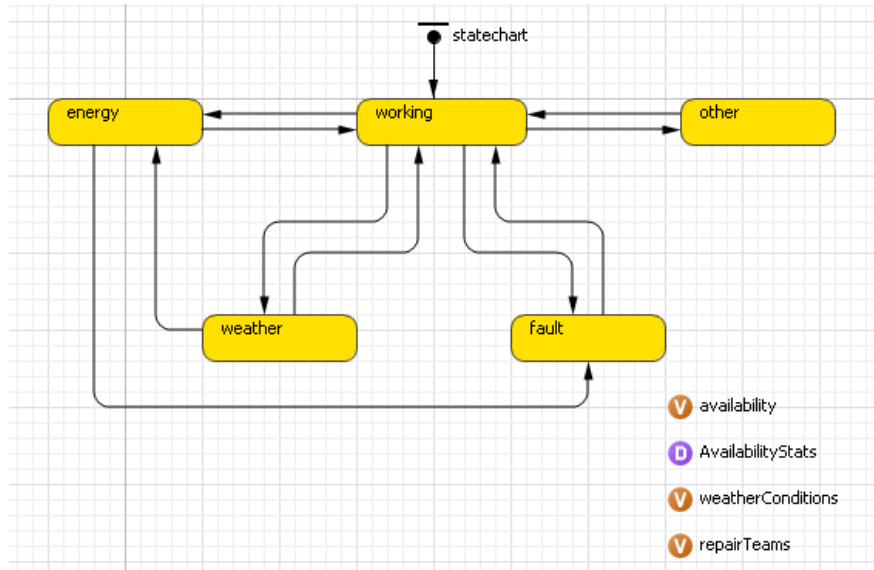


Рис. 3. Имитационная модель функционирования системы спутниковой связи в среде AnyLogic

Оптимизация резервирования проводилась методом перебора различных видов резервирования с целью достижения максимального значения целевой функции вида

$$P = D - C = \sum_{i=0}^{N-1} P_i d_i - \sum_{i=0}^{N-1} k_i c_i, \quad (2)$$

где P – прибыль оператора спутниковой связи;

D – доход оператора спутниковой связи от предоставления услуг;

C – затраты оператора на введение избыточности (структурного резервирования);

p_i – вероятность i -го состояния системы спутниковой связи;

N – общее число состояний системы, в данном случае равно пяти;

d_i – доход оператора связи при нахождении системы в i -м состоянии;

k_j – общее количество основных и резервных j -х элементов системы;

c_j – стоимость j -го элемента системы.

Следует заметить, что работоспособными состояниями системы (спутниковой станции) являются лишь состояния S_0 – «работоспособное состояние» и S_1 – «плохие погодные условия» (с частичным понижением качества предоставляемых услуг, а значит, скорости передачи и дохода).

В качестве вариантов резервирования оборудования было предложено три основных направления:

- резервирование оператора связи (использование услуг связи альтернативного провайдера);

- хранение ЗИП (антенны, передатчики, приемники, модемы, мультиплексоры, кабели, разъемы и др.);

- использование источников бесперебойного питания (ИБП) и дизельных генераторов для поддержания электропитания в случае его отключения в основной сети.

При этом резервирование отдельных элементов системы в конечном счете приводит к изменению интенсивностей перехода λ_{01} , λ_{02} и λ_{03} следующим образом:

$$\Lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i}}, \quad (3)$$

где λ_i – интенсивность отказов исходной, нерезервированной системы;

Λ – интенсивность отказов системы n -кратным с резервированием.

В данном случае предполагается использование ненагруженного («холодного») резервирования, поскольку резервные элементы до отказа основного не используются – представляют собой комплекты запасных частей (ЗИП).

Исследование различных видов резервирования показало, что максимальный коэффициент готовности $0,99993 \div 0,99998$ достигается благодаря использованию всех видов резервирования одновременно, но подобные системы довольно дороги при приобретении и обслуживании, их использование обусловлено необходимостью непрерывной связи на узлах связи, перерывы в работе которых категорически недопустимы. Для всех остальных узлов связи можно использовать резервирование с помощью ИБП и хранения ЗИП на складах.

В заключение следует заметить, что исследование показателей надежности систем спутниковой связи может осуществляться как методами аналитического (использование математического аппарата цепей Маркова), так и имитационного моделирования (с использованием программных сред имитационного моделирования, таких как GPSS и AnyLogic). Авторы данной работы имеют опыт работы с обеими названными системами, при этом для работы была использована система имитационного моделирования AnyLogic. Выбор данной системы объясняется легкостью создания дискретно-событийных имитационных моделей типа диаграммы состояний с помощью визуального графического редактора, встроенного в AnyLogic, а также набором огромного количества объектов библиотек и классов. К недостаткам можно отнести лишь необходимость владения языком программирования Java и отсутствие актуальной литературы на русском языке – учебников и монографий (кроме встроенной справки, которая, в принципе, содержит исчерпывающие сведения обо всех объектах системы и книги [2]), позволяющей легко освоить все возможности последней версии данной системы моделирования.

Литература

1. **Смит Дэвид Дж.** Безотказность, ремонтпригодность и риск. Практические методы для инженеров, включая вопросы оптимизации надежности и систем, связанных с безопасностью. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 432 с.
2. **Карпов Ю.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ
МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANYLOGIC****В. И. Закиров, В. В. Золотухин (Красноярск)**

Современные беспроводные сети связи составляют серьезную конкуренцию проводным способам доступа с использованием металлических и оптических кабелей связи. Это объясняется тем, что скорость передачи данных в беспроводных сетях, таких как Wi-Fi и WiMAX, уже составляет несколько мегабит в секунду, чего достаточно для удовлетворения запросов даже самых продвинутых пользователей сети Интернет, а по удобству работы такие сети вне конкуренции [1]. Особенно актуальным оказывается использование беспроводных сетей в тех случаях, когда прокладка кабеля невозможна или нецелесообразна по экономическим, эстетическим соображениям либо просто при нехватке времени на развертывание кабельной инфраструктуры.

Однако все беспроводные сети связи обладают одним существенным недостатком по сравнению с проводными – они не гарантируют такого уровня безопасности и конфиденциальности, каким отличаются все технологии с закрытой средой передачи сигналов. Для получения доступа к сети связи на основе металлического кабеля, например витой пары UTP-5е, требуется непосредственный доступ к среде передачи, а в случае использования оптического кабеля подключение очень сложно реализовать даже при наличии подобного доступа. С беспроводными сетями связи всё обстоит иначе: поскольку такие технологии изначально ориентированы на использование открытой среды передачи радиосигналов, доступной практически любому пользователю в зоне действия антенны, то вопросы безопасности и надежности функционирования таких сетей приобретают новый смысл.

Структура беспроводной сети связи приведена на рис. 1.

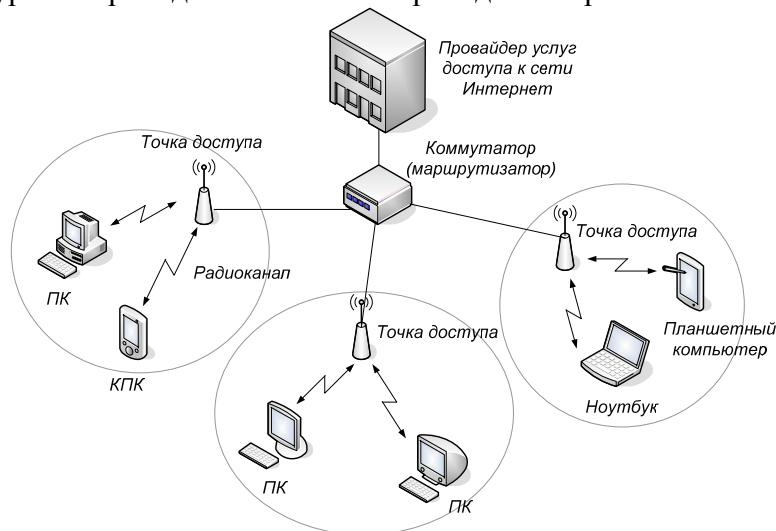


Рис. 1. Структура беспроводной сети связи

В состав сети входят следующие основные элементы:

- оборудование пользователей услугами связи, включающее в себя персональный компьютер (ноутбук, нетбук, планшетный компьютер или КПК) с оборудованием доступа к беспроводной сети связи (беспроводной адаптер или интерфейс);
- беспроводные точки доступа;
- беспроводная среда передачи информации (радиоканал);
- линии связи и оборудование провайдера услуг сети Интернет (в процессе моделирования не рассматриваются).

Среди всех известных показателей надежности сетей связи для оценки качества функционирования беспроводных сетей наиболее подходящими являются коэффициент готовности, вероятность безотказной работы и вероятность связности. Последний показатель применим только к сети связи определенной топологии [2], а задача данной работы заключается в исследовании одного простого сегмента сети – между пользователем и точкой доступа. Поэтому основное внимание уделяется такому показателю надежности, как коэффициент готовности. Следует заметить, что документом [3] регламентируется минимальное значение коэффициента готовности для сетей передачи данных, равное 0,99.

К основным причинам отказа беспроводных сетей связи можно отнести:

а) отказ радиоканала (беспроводной среды передачи информации):

- замирания в канале;
- помехи и интерференция;

б) отказ аппаратного обеспечения;

в) отказ программного обеспечения (сбои и «зависание»);

г) отказ вследствие целенаправленной атаки на систему.

В результате исследования возможных причин и последствий подобных видов отказов, а также их влияния на работу беспроводной сети связи, была разработана имитационная модель функционирования беспроводной сети в условиях воздействия всех перечисленных дестабилизирующих факторов (рис. 2). Для моделирования функционирования беспроводной сети связи использовалась среда имитационного моделирования AnyLogic [4].

В качестве основных блоков имитационной модели были выбраны объекты класса state chart (диаграммы состояний), позволяющего задать весь процесс функционирования беспроводной сети связи в виде множества состояний системы с разными коэффициентами готовности и переходов между состояниями, которые осуществляются с определенными вероятностями, задаваемыми статически или вычисляемыми динамически в процессе моделирования.

В качестве основных состояний системы использовались:

- обычное работоспособное состояние системы «work»;
- атака на систему «attack»;
- отказ системы «fail»;
- замирания в канале «fading».

К преимуществам AnyLogic можно отнести возможность создания сложных, комплексных состояний, включающих в себя множество более простых состояний и переходов между ними. В качестве примера подобного сложного состояния можно привести состояние «attack», включающее в себя такие простые состояния, как aggression, substitution device, intercept, overflow, virus, modification и denial of service.

Состояние «work» является простым и соответствует наиболее вероятному работоспособному состоянию системы беспроводной связи, в котором коэффициент готовности K_r равен единице, а пропускная способность B максимальна. В результате воздействия внешних и внутренних дестабилизирующих факторов возможны переходы в другие состояния с определенными вероятностями (интенсивностями). Каждое из таких состояний характеризуется определенным коэффициентом готовности и пропускной способностью сети.

Из рабочего состояния возможны переходы в нерабочие состояния в случае появления замираний (fading), в случае атаки на систему (attack), а также в случае отказа беспроводной сети (fail).

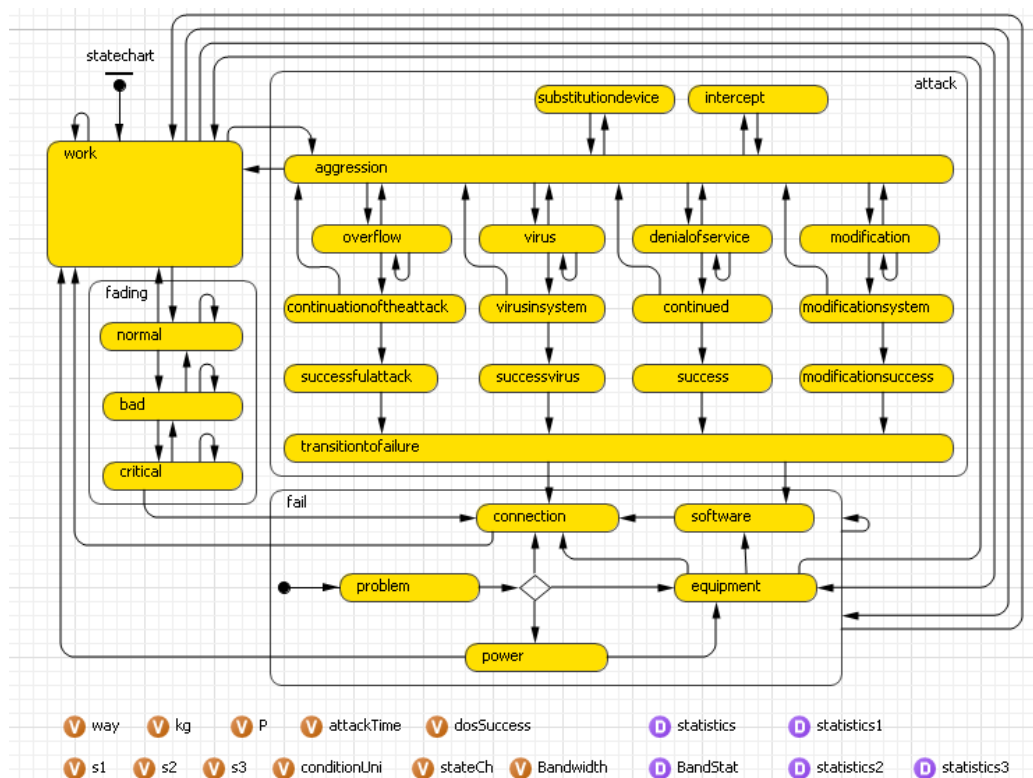


Рис. 2. Имитационная модель функционирования беспроводной сети связи в AnyLogic

«Отказ сети» представляет собой сложное состояние, состоящее из нескольких состояний – проблема с сетью (problem), отключение электропитания системы (power), отказ в соединении (connection), отказ оборудования (equipment) и сбой в работе программного обеспечения (software).

«Отказ в соединении» может произойти и в случае перехода из состояний fading и attack, а из рабочего состояния возможен переход непосредственно к отказу оборудования или к отказу сети. Отказ сети логически представлен в виде появления блока «проблема с сетью», из которого уже с помощью ветвления возможны переходы к «отказу оборудования», «отказу в соединении», «отказу питания».

Сложное состояние «отказ сети» позволяет смоделировать ситуацию с отказом питания. В этом случае возможен отказ оборудования и, как следствие, отказ в соединении. При потере питания возможно и его быстрое восстановление с последующим переходом обратно в рабочее состояние. При отказе оборудования соответственно отказывает и программное обеспечение. Состояние attack также является сложным, состоящим из следующих состояний:

- переходное состояние («aggression») представляет собой состояние перед непосредственным началом атаки, когда злоумышленник уже находится в сети, характеризуется незначительным снижением коэффициента готовности сети;
- состояние «подмена устройства» («substitution device») – в случае неавторизованного доступа, не влечет за собой отказ сети;
- состояние «перехват» («intercept») – в случае перехвата пакетов сети часть информации может теряться, состояние также не влечет за собой отказ сети;
- состояние начала модификации сети («modification») – в случае попытки изменить структуру сети или модифицировать ее с какой-то целью (например, грабежа), из этого состояния система может перейти к более опасным для нее состояниям, вплоть до полного отказа;

- состояние дальнейшей модификации сети («modification system») – произошло частичное перестроение сети;
- состояние полной модификации сети («modification success») – сеть полностью изменена в соответствии с желаниями злоумышленника; из этого состояния сеть переходит в неисправное состояние (либо connection, либо software);
- состояние начала отказа в обслуживании («denial of service») – возникает в случае попытки лишить обслуживания абонентов сети, при переходе в менее безопасные состояния может привести к отказу в соединении либо к отказу программного обеспечения;
- состояние частичного отказа в обслуживании («continued»), когда полностью связь ещё не потеряна, но наблюдается существенное снижение пропускной способности;
- состояние успешной атаки, направленной на отказ в обслуживании («success») – злоумышленник уже нарушил соединение, из него система переходит в состояние отказа (либо connection, либо software);
- состояние заражения системы («virus») – в случае появления вредоносных программ; при переходе в состояния с большей степенью заражения может привести к отказу;
- состояние дальнейшего заражения («virus in system») – антивирусная система не смогла сразу обнаружить угрозу, характеризуется снижением быстродействия системы;
- состояние успешного внедрения вредоносных программ («success virus») характеризуется нарушением работы системы, вследствие чего возможна потеря соединения или отказ программного обеспечения;
- состояние в случае начала атаки, направленной на переполнение системы, («overflow») – начинает внедряться большое количество пакетов в сеть, при переходах в дальнейшие состояния пропускная способность может снижаться вплоть до полного отказа;
- состояние дальнейшего переполнения («continuation of the attack») – число пакетов в системе уже значительно, но пока не является критичным;
- состояние успешного переполнения системы («successful attack») – когда число пакетов уже критично и далее следует переход в состояние отказа (либо connection, либо software);
- переход к отказу («transition to failure») – используется для упрощения схемы, являясь промежуточным состоянием между успешными атаками и отказом.

Вероятности переходов между состояниями могут задаваться исследователем либо в виде фиксированных чисел на основе собранной на практике статистики, либо в виде более сложных аналитических моделей. Например, авторами данной работы была использована математическая модель расчета вероятности успешной SYN-flood атаки на основе сетей Петри–Маркова, предложенная в [5]:

$$P(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

где $P(t)$ – вероятность успешной реализации атаки от времени t ;

τ – среднее время перехода по всей сети Петри, равное в данном случае 11,15 с.

Разработанная имитационная модель может быть использована для исследования влияния различных способов структурного резервирования и методов защиты от атак на комплексные показатели надежности функционирования беспроводной сети связи, например на коэффициенты готовности K_r и простоя K_p .

В таблице для примера приведены результаты моделирования функционирования системы.

Результаты моделирования функционирования беспроводной сети связи при различных методах резервирования и защиты

Вид воздействия	K_r сети	Пропускн. способн.
Сканирование сети	1,000	1,000
Подмена устройства	0,999	0,990
Перехват пакетов	0,999	0,980
Отказ в обслуживании	0,998	0,950
Модификация сети	0,997	0,950
Вредоносные программы	0,997	0,950
Переполнение	0,997	0,950
Комплексная атака	0,995	0,900
Замирания	0,996	0,985
Атаки с учетом состояния радиоканала	0,994	0,884
Отказ элементов сети	0,997	0,994
Отказ сети с учетом всех воздействий	0,991	0,881

В заключение следует заметить, что наиболее острым вопросом данной имитационной модели остается выбор исходных данных для моделирования, в частности математических моделей для расчета вероятностей перехода из одного состояния в другое. По сути, от точности исходных данных будет во многом зависеть достоверность полученных результатов. В качестве исходных данных могут быть использованы результаты обработки накопленной статистики об отказах за определенный период времени, а также современные аналитические модели, подобные [5]. Причем в данной имитационной модели предусмотрена возможность отключения отдельных ветвей диаграммы состояний, что дает возможность исследовать последствия отдельных видов отказов и атак раздельно.

Литература

1. Вишневский В. М. Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М.: Техносфера, 2009. 472 с.
2. Филин Б. П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
3. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М.: Стандартинформ, 2008. 16 с.
4. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.
5. Радько Н. М., Скобелев И. О. Риск-модели информационно-телекоммуникационных систем при реализации угроз удаленного и непосредственного доступа. М.: РадиоСофт, 2010. 232 с.

**АГЕНТНАЯ ПАРАДИГМА КОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИИ В ЗАДАЧАХ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ GRID-ИНФРАСТРУКТУР****Е. О. Кринецкий, Ю. А. Шебеко (Москва)**

Непрерывное развитие науки и повышение сложности решаемых задач приводит к тому, что для своевременного решения сложных задач становится недостаточно стандартных вычислительных мощностей. В связи с этим большой интерес вызывает применение Grid-технологии[1]. Под Grid-инфраструктурой понимается программно-аппаратная среда, которая построена из вычислительных установок, пространственно распределенных в открытой сетевой среде, позволяющей дистанционно использовать любое количество ресурсов этих установок для выполнения широкого класса приложений. Под ресурсами понимаются процессоры, оперативная и постоянная память, программы и данные. Отметим наиболее значимые свойства Grid:

- Автономность ресурсов. Ресурсная база Grid формируется из независимых друг от друга вычислительных центров или отдельных компьютеров. Ресурсы обслуживаются и администрируются владельцами, которые имеют право проводить собственную политику доступа к ним;
- Гетерогенность ресурсов. Ресурсы, вовлеченные в Grid, имеют различные характеристики аппаратного и программного обеспечения, поэтому следует подбирать только те ресурсы, характеристики которых отвечают необходимым требованиям;
- Глобальная распределенность. Составляющие Grid вычислительные установки распределены в открытой глобальной сетевой среде, в которой велики коммуникационные издержки и предъявляются повышенные требования к безопасности;
- Коллективный режим работы. Ресурсы Grid используются в коллективном режиме, поэтому необходимо гибкое и скоординированное их распределение между пользователями, решающими разные задачи;
- Динамичность среды. Как состав ресурсов, так и состав пользователей может меняться, причем это является правилом, а не исключением.

Набор функций, которые требуются в Grid-системах от программного обеспечения – это обеспечение безопасности, надежности, мониторинга заданий и устройств, учета и протоколирования заданий. Ключевое место в этом ряду занимает функция диспетчеризации заданий. Эта функция обеспечивает распределение ресурсов из общего ресурсного пула Grid между заданиями, доставку программ и данных, реализуя одну из важнейших концепций Grid, а именно виртуализацию ресурсов. Этот процесс распределения называется задачей аллокации.

Служба диспетчеризации[2, 3] выполняет автоматическую обработку множества заданий, включая распределение заданий по доступным ресурсам – планирование, доставку необходимых входных файлов на ресурс, запуск, управление и мониторинг выполнения задания, доставку выходных файлов.

Независимо от того, как планируется расписание выполнения заданий, до запуска либо в реальном времени, для алгоритма планирования всегда можно выделить время планирования процессов на многопроцессорной системе. Это время определяется моментом между получением планировщиком информации об освобождении процессора и моментом непосредственного назначения работы на исполнение. Важной задачей является минимизация этого времени. Обычно расписание, близкое к оптимальному, требует большого времени планирования, а быстро сделанное расписание будет далеко от оптимального. Поэтому приходится искать компромисс.

Самым простым методом разделения пространства ресурсов между заданиями является метод FCFS [4]. Механизм работы данного алгоритма заключается в том, что

задание, поступившее в очередь раньше других, имеет самый высокий приоритет и должно быть запущено первым. Если для запуска такого задания оказывается недостаточно ресурсов, то ожидается момент времени, когда накопится нужный объем требуемых ресурсов и задание будет запущено. Порядок заданий в очереди не может быть нарушен. Данный метод гарантирует запуск задания, но неэффективно расходует ресурсы, так как в период накопления ресурсов для самого приоритетного задания часть ресурсов простаивает. Это основной недостаток метода, поэтому у него существуют различные модификации, призванные повысить эффективность распределения ресурсов.

Более интересный способ решения предлагает метод обратного заполнения BackFill [5,6]. В отличие от рассмотренного ранее FCFS, он требует от пользователей ориентировочную оценку времени выполнения их заданий. Это позволяет выделить ресурсы для заданий заблаговременно. Для этого строится расписание запусков заданий.

В процессе построения расписания ресурсы выдаются заданиям в порядке их приоритетов. Алгоритм Backfill работает по следующему принципу: размещая наиболее приоритетное задание, он определяет момент времени, когда освободится достаточное количество ресурсов, и резервирует эти ресурсы. Задание с меньшим приоритетом может быть запущено вне очереди только в том случае, если оно не будет мешать запуску более приоритетных заданий, например, если свободных ресурсов недостаточно для запуска задания с высоким приоритетом. Таким образом, данный метод позволяет распределять задания по ресурсам с нарушением порядка очереди, что способствует более эффективной загрузке ресурсов. Кроме того, алгоритм обладает следующими достоинствами:

- работая на основе приоритетов, он позволяет предотвратить зависание задания и гарантирует его запуск;
- эффективно загружает ресурсы, не допуская их фрагментации;
- работает с множеством гетерогенных ресурсов;
- достаточно быстро, даже при работе на большом количестве вычислительных узлов.

Основной целью работы является создание прототипа имитационной модели (ИМ) Grid-инфраструктуры. ИМ позволит адекватно оценивать поведение Grid-инфраструктуры при изменяющихся условиях, а также оценивать стратегию управления потоками задач и при необходимости корректировать ее. В качестве выбранных стратегий распределения ресурсов в работе реализуются рассмотренные ранее алгоритмы, а также их модификации [7, 8, 9].

При разработке прототипа ИМ был использован продукт AnyLogic 6.5. Разработанная ИМ представляет собой агентную модель, в которой взаимодействуют два различных типа агентов – агенты-ресурсы и агенты-задания.

Механизм взаимодействия этих двух видов агентов может изменяться в зависимости от используемого алгоритма распределения. В ИМ предполагается, что производительность ресурсов характеризуется временем выполнения на них стандартного задания. Стандартное задание – то, которое требует T секунд процессорного времени одного ресурса со стандартной производительностью V операций в секунду. При этом задания отличаются своей сложностью и требованиями к количеству процессоров, необходимых для их решения. Под сложностью определено время выполнения задания на стандартном ресурсе в течение времени $1T$, $2T$, $3T$ и т.д. Требование к количеству процессоров мы назовем размерностью задания D . D – количество процессоров одинаковой производительности, необходимых для выполнения задания.

Для прототипа ИМ разработан интерактивный интерфейс, который позволяет следить за ходом распределения заданий по ресурсам, отслеживать изменение основных показателей работы модели, воздействовать на управляющие параметры. Кроме

того реализован механизм, позволяющий перенастраивать конфигурацию моделируемой Grid архитектуры. Модель дает возможность анализировать ход выполнения эксперимента по следующим критериям:

- количество используемых и доступных процессорных узлов;
- загруженность кластеров в процентном соотношении по каждому часу и дню;
- количество задач, выполняющихся в данный момент времени, и ждущих выполнения;
- количество отказов различных узлов инфраструктуры;
- среднее использование процессорных элементов кластеров за каждый час.

Разработан прототип ИМ, позволяющей конфигурировать различные Grid-инфраструктуры. Был проведен ряд экспериментов для выбранной Grid-инфраструктуры с заранее определенными заданиями. Результаты экспериментов сравнивались с результатами других симуляторов [8, 9] для тех же начальных условий. Сравнительный анализ данных результатов показал неполное совпадение. Этот факт объясняется тем, что в разработанной модели были учтены не все возможные факторы, но при устранении этих недостатков созданная модель может применяться для моделирования реальной Grid-инфраструктуры. Агентный подход является одним из эффективных средств при решении задачи аллокации для Grid-инфраструктур.

Литература

1. **Грушин Д. А., Поспелов А. И.** Система моделирования Grid: реализация и возможности применения. Институт системного программирования РАН (ИСП РАН). М.
2. **Garey M. R. and Johnson D. S.** Computers and Intractability; a Guide to the Theory of Np-Completeness. W. H. Freeman & Co., 1990. P. 338, ISBN: 0716710455.
3. **Cera Marcia C., Pezzi Guilherme P., Mathias Elton N., Maillard Nicolas, Navaux Phillipe O. A.** Improving the Dynamic Creation of Processes in MPI-2 // Lecture Notes in Computer Science LNCS 4192 Recent Advantages in Parallel Virtual Machine and Message Passing Interface. 2006. Vol. 4192. P. 247–255. ISBN-10: 3-540-39110-X ISBN-13: 978-3-540-39110-4.
4. **Schwiegelshohn U. and Yahyapour R.** Analysis of First-Come-First-Serve Parallel Job Scheduling // In Proceedings of the 9th SIAM Symposium on Discrete Algorithms, 1998. P. 629–638. http://www-ds.e-technik.uni-dortmund.de/~yahya/papers/cei_soda98.pdf
5. **Коваленко В. Н., Корягин Д. А.** Организация ресурсов грид. Препринт ИПМ РАН, № 63, стр. 1-25, Москва, 2004.
6. **Коваленко В. Н., Коваленко Е. И., Корягин Д. А., Любимский Э. З.** Метод опережающего планирования для грид. Препринт ИПМ РАН, М., 2005.
7. **Коваленко В. Н., Коваленко Е. И., Корягин Д. А., Семячкин Д. А.** Управление параллельными заданиями в гриде с неотчуждаемыми ресурсами ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. М., 2007.
8. GridSim: A Grid Simulation Toolkit for Resource Modelling and Application Scheduling for Parallel and Distributed Computing. <http://www.buyya.com/gridsim/>
9. SimGrid: a Generic Framework for Large-Scale Distributed Experimentations. <http://simgrid.gforge.inria.fr/publis.html>

О ПРИМЕНЕНИИ СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ANYLOGIC В ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА АДМИНИСТРАТОРОВ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Д. В. Мишин (г. Радужный)

Способность АСУП выполнять установленный объем возложенных на нее функций (с требуемыми показателями качества) напрямую зависит от эффективного управления проведением восстановительных работ корпоративной сети передачи данных (КСПД) [1] – основной технологической подсистемы АСУП. Делая допущение о наличии у предприятия необходимых материальных (финансовых, технических, человеческих) ресурсов для восстановления работоспособности элементов КСПД, авторы предлагают решать задачу оптимизации по времени процесса восстановления поврежденных элементов КСПД (оперативного администрирования), как наименее затратного по стоимости решения повышения функциональной устойчивости АСУП.

Работа посвящена имитационному исследованию моделей и алгоритмов, предложенных авторами в рамках модели автоматизированной системы администрирования (АСА) КСПД [2], для оптимизации административных ресурсов (управляющих субъектов – администраторов). Разработанная имитационная модель позволяет рассматривать администратора КСПД как автоматизированную систему, характеризующуюся множеством динамических параметров. Рассмотрим основные элементы модели.

Введем понятие администрируемый элемент (АЭ) КСПД, где под АЭ будем понимать программный, аппаратный, телекоммуникационный модуль КСПД, структурно и функционально неделимый в рамках процесса администрирования. Под администрированием КСПД будем понимать целенаправленные управляющие воздействия на АЭ (реализация функций управления сетью), осуществляемые администраторами, в рамках обеспечения надежной, производительной и безопасной работы КСПД (целевой задачи администрирования). Обозначим множество АЭ заданной КСПД как $E_{\text{КСПД}} = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. Множество узлов заданной КСПД обозначим как $S_{\text{КСПД}} = \{s_1, s_2, \dots, s_r\}$, где каждый узел характеризуется показателем значимости (R) для выполнения ИП АСУП. В общем виде $s_j = \langle E_j, R_j \rangle$, где $E_j \subset E_{\text{КСПД}}$ – подмножество АЭ узла s_j , R_j – численное значение показателя значимости [3]. Как элемент объекта управления e_i будем характеризовать множеством изменяемых параметров $P_i = \{p_1, p_2, \dots, p_y\}$, $P_i \subset P_{\text{КСПД}}$, где $P_{\text{КСПД}} = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – полное множество уникальных параметров КСПД. Множество значений параметров (состояние) элемента e_i обозначим как $P_i^* = \{p_{i1}^*, p_{i2}^*, \dots, p_{iy}^*\}$.

Введем понятие функции администрирования (ФА) с точки зрения АСА КСПД. Под функциями ФА будем понимать элементарные воздействия на АЭ КСПД с целью получения или изменения значений их параметров, выполняемые администратором (или группой администраторов) в рамках функций управления сетью. Под конечным множеством $AF_{\text{кспд}} = \{af_1, \dots, af_w\}$ будем понимать полное множество ФА заданной КСПД. В общем случае $P_i^{*L+1} = af_i(P_i^{*L})$, где P_i^{*L} – состояние элемента e_i на шаге L , P_i^{*L+1} – состояние элемента e_i на шаге $L+1$. Целевым параметром p_u функции af_u назовем объект управляющих воздействий ФА (параметр АЭ), $p_u \in P_{\text{КСПД}}$. Функция af_u характеризуется единственным целевым параметром p_u , параметр p_u может являться целевым для множества $AF_u \in AF_{\text{КСПД}}$. Зададим ФА следующими характеристиками: нормой времени на выполнение (*standard time* – St), коэффициентом сложности (*complicacy* – Com), алгоритмом выполнения (*algorithm* – Alg). Имеем $af_u = \langle Fid_u, St_u, Com_u, Alg_u \rangle$, где Fid_u – идентификатор af_u .

Под администратором (А) АСА КСПД будем понимать субъект доступа к АЭ – автоматизированную человеко-машинную систему, характеризующуюся множеством динамических параметров (свойств) и способную исполнять некоторое множество ФА

(с определенным показателем качества выполнения). Под множеством $A_{кспд} = \{a_1, \dots, a_y\}$ будем понимать множество администраторов заданной КСПД. Администратор a_n способен выполнять подмножество $AF_n \subset AF_{кспд}$ с индивидуальными показателями качества выполнения, где AF_n – множество ФА, исполняемых a_n . На каждом шаге (L) процесса администрирования a_n способен исполнять только одну $af_u \in AF_n$ [4].

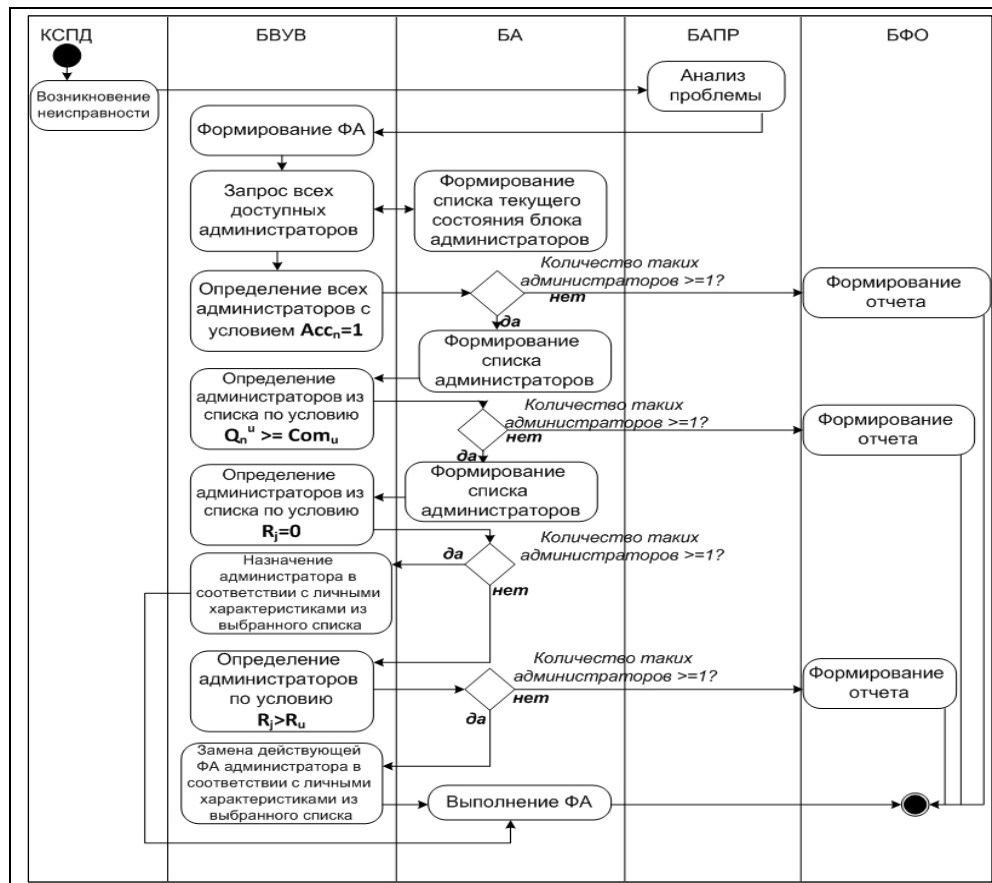


Рис. 1. Пример простого алгоритма выбора администратора

Зададим администратора множеством $a_n = \langle Aid_n, Acc_n, Emp_n, W_n, M_n \rangle$, где:

- параметр Aid_n – идентификатор администратора;
- параметр Acc_n – доступность в данный момент времени (*accessibility*);
- параметр Emp_n – занятость (задействованность) в реализации какой-либо ФА (*employment*);
- параметр W_n – трудозатраты (вычисляется по совокупности проделанных работ за день, в зависимости от их сложности и времени выполнения) (*work*);
- параметр M_n – матрица компетенций выполнения ФА $M_n ||h, g||$, где h – количество характеристик компетентности выполнения ФА, g – мощность множества $AF_{кспд}$.

Компетенция выполнения af_u – набор динамических характеристик, вычисляемый для $af_u \in AF_n$, представляющий массив значений $M_n = \langle Fid_n^u, Q_n^u, At_n^u, T_n^u \rangle$, где:

- параметр Fid_n^u – идентификатор af_u администратора a_n ;
- параметр Q_n^u – квалификация (*qualification – Q*) администратора (характеризует профессиональную подготовку администратора a_n для выполнения af_u). Уровень квалификации администратора может повышаться за счет обучения (курсы повышения квалификации, тренажеры выполнения af_u и т.д.);

- параметр At_n^u – опыт (*attempt – At*) выполнения af_u администратором a_n (данный параметр модифицируется по окончании очередного выполнения af_u в зависимости от результата);
- параметр T_n^u – среднее время (*average time – T*) выполнения af_u администратором a_n .

Кроме выделяемых параметров существуют и другие, связанные, например, с психофизиологическими особенностями администратора как живого существа (устоляемость, импульсивность в принятии решений, нерешительность и др.), но в данной работе они рассматриваться не будут.

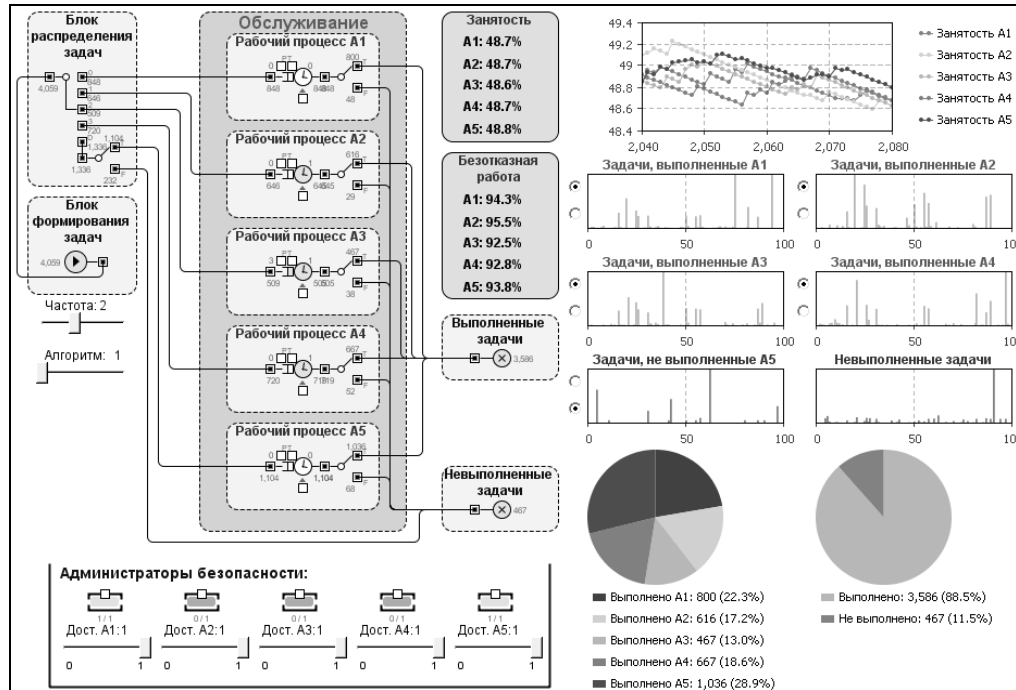


Рис. 2. Модель АСА КСПД в среде моделирования AnyLogic

Выбор конкретного a_n для выполнения конкретной af_u предлагается осуществлять на основе приоритета R_j [3] администрируемого элемента e_j , индивидуальных параметров a_n . Пример использования моделей представлен на рис. 1 простым алгоритмом выбора администраторов. Модель позволяет выбирать администратора на основе текущих требований руководства. Оптимизация выбора может происходить по следующим параметрам администратора: At , T . Оптимизация по среднему времени исполнения T возможна в случае повышенных требований к времени выполнения ФА. Оптимизация по опыту исполнения At возможна в случае повышенных требований к качеству выполнения ФА или для повышения опыта менее опытных сотрудников (администраторов) при создании тренажеров и т.д.

На рис. 2 представлен вариант реализации предложенной модели в среде имитационного моделирования AnyLogic. Модель позволяет генерировать параметризованные заявки – известные задачи администрирования (среди значимых параметров: R_j , Com_u и St_u), на обработку которых согласно одному из предложенных алгоритмов выделяются ресурсы – назначаются администраторы с известными параметрами (среди них: Q_n^u , T_n^u , At_n^u). Аналитическая подсистема имитационной модели выполняет функции контроля выполнения задач и анализа занятости администраторов (рис. 3). Подсистема управления действиями обеспечивает выбор исполнителей в соответствии с целями и на основании данных аналитического модуля.

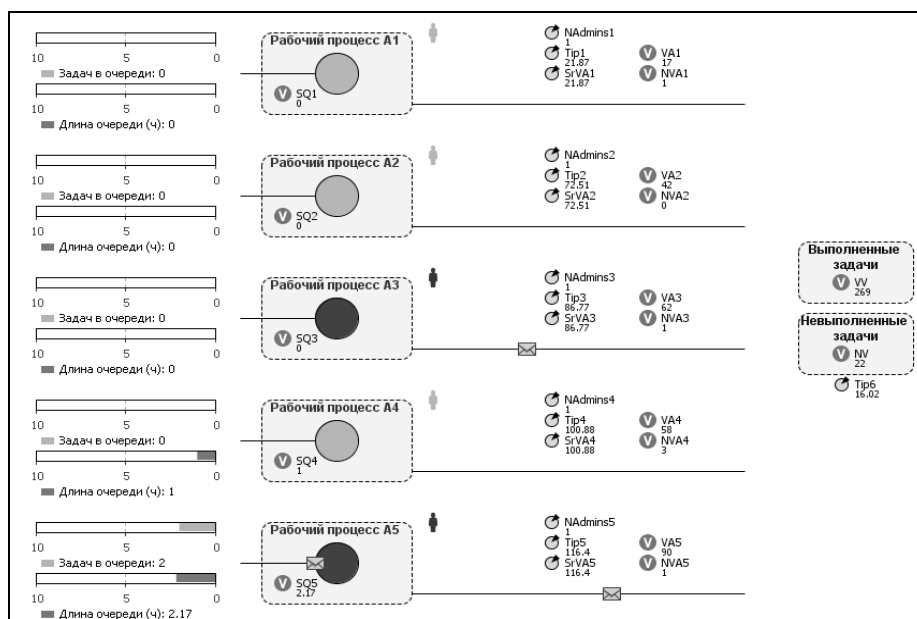


Рис. 3. Модель АСА КСПД в среде моделирования AnyLogic

Для модели (в среде AnyLogic) были разработаны три алгоритма, каждый из которых позволяет осуществлять отбор кандидатов в соответствии с целями (надежность, обучение, скорость). Основными критериями отбора для всех алгоритмов являются: соответствие квалификации администратора сложности выполняемой задачи. Пример одного из алгоритмов выбора администраторов представлен на рис. 4.

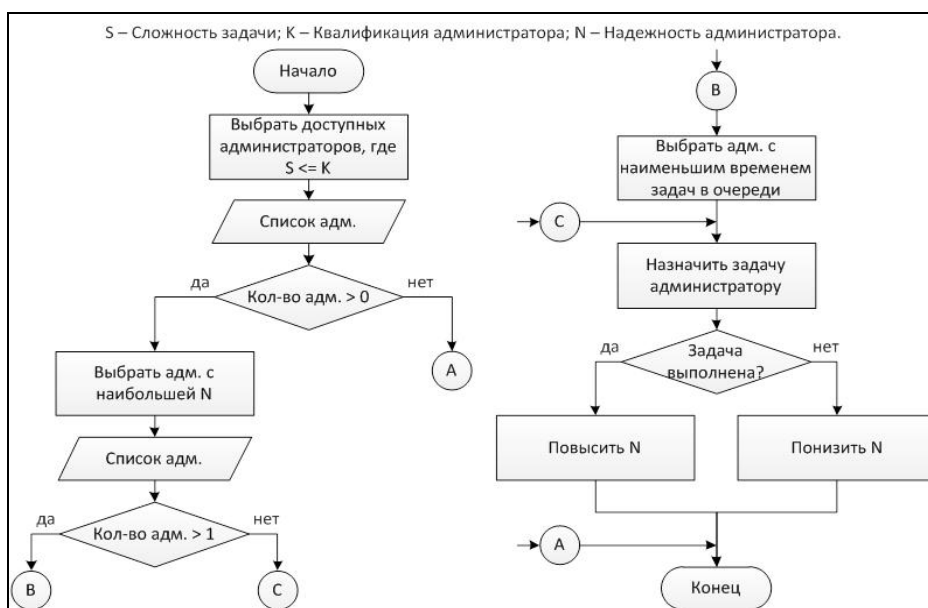


Рис. 4. Пример алгоритма выбора администраторов

Ключевыми особенностями разработанной модели являются: поддержка приоритетов заявок и имитация полных или частичных отказов администраторов. Результаты имитационного исследования алгоритмов [5,6] свидетельствуют о повышении надежности и снижении среднего времени выполнения ФА (табл. 1) по сравнению с классической моделью распределения работ (табл. 2), что позволяет говорить о возможности применения предложенных моделей и алгоритмов для решения задачи оптимизации управления администраторами и, как следствие, повышения функциональной устойчивости АСУП.

Таблица 1

Результаты исследования алгоритмов предложенной модели управления

Алгоритм	Кол-во назначенных ФА	Кол-во ошибок выполнения ФА	Суммарное время выполнения ФА	Занятость администратора, %	Надежность выполнения ФА, %
A1	496	2	729	35,1	99,6
A2	947	12	819	39,4	98,7
A3	822	2	1214	58,4	99,8
A4	801	10	1381	66,4	98,5
A5	1178	11	1220	58,7%	99,0

Таблица 2

Результаты исследования классической модели управления

Алгоритм	Кол-во назначенных ФА	Кол-во ошибок выполнения ФА	Суммарное время выполнения ФА	Занятость администратора, %	Надежность выполнения ФА, %
A1	496	27	1179	56,7	94,0
A2	947	18	1176	55,6	98,0
A3	822	29	1183	58,8	96,4
A4	801	23	1177	66,3	97,1
A5	1178	31	1178	58,7	97,3

Литература

1. **Кульгин М.** Технологии корпоративных сетей// Энциклопедия. СПб.:Питер, 1999.
2. **Мишин Д. В., Монахова М. М.** Модель автоматизированной системы администрирования корпоративной сети передачи данных // Интеллектуальные системы: Труды Девятого международного симпозиума / Под ред. К.А. Пупкова. М.: РУСАКИ, 2010.
3. **Mishin M. M. Monakhova** About the optimization of the administration corporate area networks of the data transmission under scarce administrative resources // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. Kharkov: NTU "KhPI". 2011. №17. 197 p.
4. **Мишин Д. В., Монахова М. М.** Модель администратора корпоративной сети передачи данных//XII Санкт-Петербургская международная конференция "Региональная информатика (РИ-2010)". Санкт-Петербург: Труды конференции \ СПОИСУ. СПб, 2010.
5. **Мишин Д. В., Монахова М. М.** Алгоритм выбора администраторов корпоративной сети передачи данных //Информационные системы и технологии ИСТ-2011: Материалы XVII Международной научно-технической конференции. Н. Новгород: Электронное издание. 2011.
6. **Мишин Д. В., Монахова М. М.** Алгоритмы распределенного администрирования корпоративных сетей передачи данных // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 16-й Международной науч.-техн. конф. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2010.

**СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВЫХ СИСТЕМ
В СРЕДЕ MS EXCEL****В. П. Морозов (Санкт-Петербург)**

Возможности внедрения моделирования в решение задач, связанных с практической деятельностью, определяются наличием двух основополагающих моментов: наличием методик моделирования, доступных пониманию широкого круга пользователей, и наличием соответствующих программных средств, не требующих серьезных трудозатрат на освоение и эксплуатацию. Исходя из этого, в основу предлагаемой системы положены: ориентированная на конечного пользователя методология моделирования на основе алгоритмических сетей и получившая широкое распространение программная среда MS Excel. С точки зрения конечного пользователя данная система может рассматриваться как расширение возможностей MS Excel в область моделирования и поддержки принятия решений.

Методология моделирования на основе алгоритмических сетей, разработана в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН [1–5]. Основные компоненты методологии, согласно [1], включают:

1. Соглашение о допустимом минимуме профессиональных знаний предполагаемых пользователей.

2. Алгоритмический подход как парадигму моделирования, наилучшим образом отражающую специфику процедурных предметных знаний пользователей, а именно: представление математических моделей, описывающих процедурные знания предметной области в виде алгоритмов, структуризация вычислительных процедур которых осуществлена в соответствии с представлениями пользователя о причинно-следственных или временных связях явлений, характеризующих моделируемые объекты.

3. Доступный пользователю единый графический язык представления для описания моделей знаний предметной области, математических моделей решаемых задач и вычислительных алгоритмов, по которым осуществляется решение. Язык, оперирующий исключительно функциональными зависимостями, имеющими место в предметной области, которой принадлежит исследуемый объект – язык алгоритмических сетей (ЯАС).

4. Автоматизацию программирования, обеспечивающую возможность решения новых задач.

5. Использование методов, ориентированных на привлечение плохо формализуемых знаний ЛПР непосредственно в процесс получения конечного результата.

На сегодняшний день методология, ориентированная на предметные знания эксперта, реализуется в двух основных направлениях:

♦ Поддержка принятия решений в ходе решения задач, связанных с необходимостью формирования исходного множества альтернатив.

♦ Поддержка принятия решений в ходе решения задач, связанных с выбором наилучшей альтернативы из некоторого множества заданных.

В качестве языка представления в методологии используется язык ЯАС [4, 5] – графический язык, оперирующий исключительно функциональными зависимостями, имеющими место в предметной области, которой принадлежит исследуемый объект.

Основными понятиями ЯАС являются понятия функционального оператора и интерфейсной дуги.

Функциональный оператор реализует функциональное отношение, связывающее явления, которые представляют объект моделирования. Графическим отображением

функционального оператора является круг, внутри которого помещен символ реализуемого оператором класса функций. Конкретный вид функции определяется множеством входных и выходных дуг, связанных с данным оператором. Различают операторы ввода–вывода информации и преобразующие операторы сети. Последние разделяются на операторы-вычислители, реализующие аналитические выражения элементарной математики, операторы-распознаватели, реализующие конструкции типа «IF_THEN_ELSE», и оператор «задержка по времени» (операторы данного вида необходимы для учета последствий в модели и позволяют описывать динамику объекта). Формирование выходных переменных оператора осуществляется, как только становятся известными все его входные переменные. Таким образом, «срабатывание оператора» в вершинах сети носит асинхронный характер, и сама алгоритмическая сеть предстает в виде алгоритма, описывающего параллельные вычисления.

Интерфейсная дуга отображает одно из множества явлений, характеризующих объект моделирования. Графическим отображением интерфейсной дуги является однонаправленная стрелка. Направление стрелки определяет связь явлений в модели. Каждая интерфейсная дуга имеет уникальный номер и имя, являющееся оборотом существительного.

Синтаксис ЯАС включает ряд запретов и ограничений:

- ♦ запрет вычисления одной и той же переменной более чем одним оператором (конструкция «неоднозначность»);

- ♦ запрет использования в качестве входной информации оператора информации, являющейся результатом его расчета, в случае, если в образовавшемся контуре отсутствует оператор «задержка по времени» (конструкция «дедлок»);

- ♦ запрет соединения альтернативных процессов моделирования в любых операторах сети, кроме оператора логического слияния (конструкция «зависание»).

В качестве примера рассмотрим простейшую алгоритмическую модель «Демография». Алгоритмическая сеть модели представлена на рис. 1. Модель описывает процессы, происходящие с населением региона в течение выбранного интервала времени, и обеспечивает определение количества населения на конец года X_{10} в зависимости от начального значения X_1 , доли убытия X_2 , коэффициента естественного прироста X_6 , механического прироста X_9 . Модель позволяет рассмотреть процесс во времени благодаря использованию оператора «задержка» Δt , определяющего значение переменной на конец текущего периода в качестве начального значения соответствующей переменной для последующего периода: $X_1(t+1) = X_{10}(t)$. Кроме того, модель определяет величину трудового ресурса региона X_{12} на основании доли трудового ресурса X_{11} и количества имеющегося населения X_{10} . В таблице приведены наименования переменных модели и расчетные формулы, их связывающие.

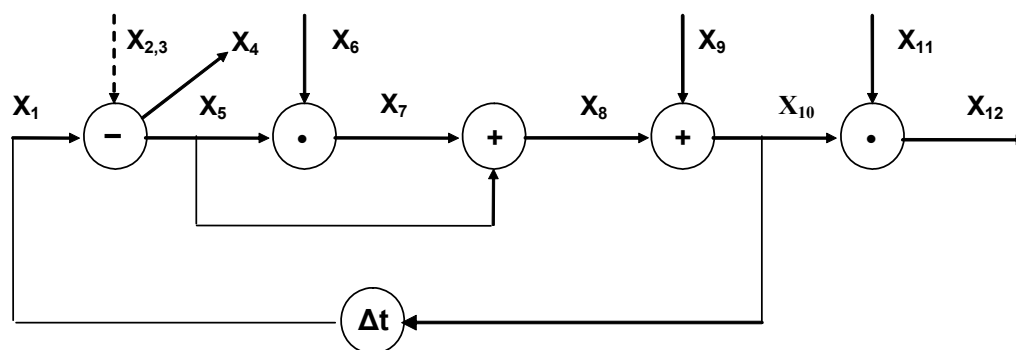


Рис. 1. Алгоритмическая сеть модели «Демография»

Переменные и расчетные формулы модели «Демография»

Входные переменные	Расчетные переменные	
Наименование переменной	Наименование переменной	Расчетная формула
X_1 – количество населения на начало года	X_4 – количество убывшего населения	$X_4(t) = X_1(t) * X_2(t)$
X_2 – доля убывшего населения	X_5 – количество оставшегося населения	$X_5(t) = X_1(t) * X_3(t)$
X_3 – доля оставшегося населения	X_7 – естественный прирост населения	$X_7(t) = X_5(t) * X_6(t)$
X_6 – коэффициент естественного прироста	X_8 – коренное население	$X_8(t) = X_5(t) + X_7(t)$
X_9 – механический прирост населения	X_{10} – населения на конец года	$X_{10}(t) = X_8(t) + X_9(t)$
X_{11} – доля трудового ресурса	X_{12} – трудовой ресурс региона	$X_{12}(t) = X_{10}(t) * X_{11}(t)$
Передача значения населения в конце года t на начало года $t + 1$ для последующего расчета		$X_1(t+1) = X_{10}(t)$

Методология моделирования на основе алгоритмических сетей прошла успешную проверку на практике. На ее основе был создан ряд систем, эксплуатировавшихся в различных организациях, в том числе в Госплане России. Среди предметных областей, для которых были разработаны алгоритмические модели, можно назвать макроэкономику, промышленность, химию, кораблестроение, военное дело, городское и сельское хозяйство, экологию. Система автоматизации моделирования «САПФИР-Искра.87» награждена серебряной медалью ВДНХ СССР, модель «Россия 84» – бронзовой медалью.

Одной из причин недостаточного распространения системы, по мнению разработчиков, стала, как это ни парадоксально, оригинальность разработки, в связи чем было принято решение реализовать технологию КОГНИТРОНа в широко используемой среде MS Excel.

Разрабатываемая в среде MS Excel система (КОГНИТРОН-Excel) предназначена для решения проблемы автоматизации моделирования на базе алгоритмических сетей, как на этапе создания моделей, так и на этапах проведения модельных экспериментов и принятия решений на их основе.

Система ориентирована на пользователя-эксперта в области принимаемых решений, для которого математика и программирование не являются основной сферой деятельности. Согласно принятому соглашению о минимально допустимых знаниях пользователя предполагается, что последний имеет представление о причинно-следственных или временных связях переменных, описывающих решаемую задачу, возможных интервалах изменения их значений, а также знание математики по крайней мере на уровне средней школы.

Пользователями системы могут быть лица среднего и высшего управляющего звена (поддержка принятия решений), а также научные сотрудники, осуществляющие исследования на основе моделирования (поддержка построения моделей и проведения модельных экспериментов).

Система поддерживает полный цикл работы с моделью от ввода ее аналитического представления до модельного эксперимента (расчета), реализуемый с помощью трех основных режимов: «Модель», «Данные» и «Эксперимент».

Режим «Модель» предназначен для ввода в систему исследуемой модели. Специфика среды реализации не позволяет обеспечить традиционный графический ввод, поэтому в качестве альтернативы в системе используется ввод с помощью шаблонов, соответствующих аналитическим выражениям, реализуемым операторами алгоритмической сети. Экранная форма режима представлена на рис. 2. Режим обеспечивает ввод и редактирование операторов, коротких и длинных имен переменных, синтаксическую проверку модели, а также ввод и редактирование ее описания. Порядок ввода операторов произволен.

Режим «Данные» обеспечивает формирование массивов данных, используемых в ходе модельных экспериментов. Ввод значений переменных автоматизирован благодаря возможности генерации констант, а также за счет использования линейной интерполяции значений введенных переменных. Режим позволяет просматривать и редактировать существующие массивы. Экранная форма режима представлена на рис. 3.

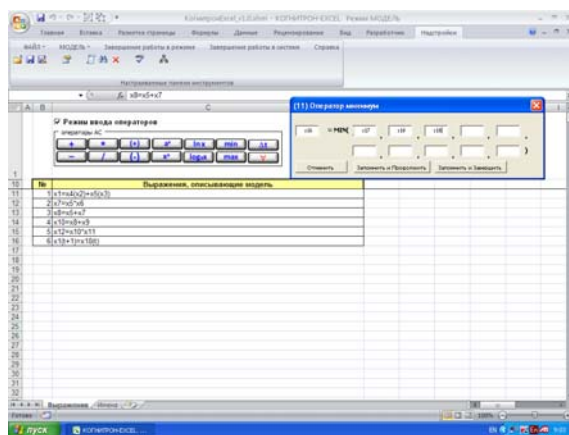


Рис. 2. Режим «Модель»

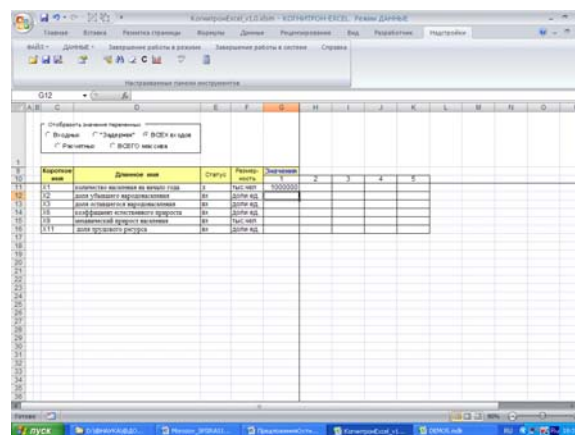


Рис. 3. Режим «Данные»

Режим «Эксперимент» позволяет провести эксперименты с моделью, как для изучения свойств исследуемого объекта, так и для формирования информации, необходимой для принятия соответствующих решений.

Система обеспечивает имитационный и аналитический способы получения требуемых результатов. В имитационном режиме пользователю предоставляются подсказки, облегчающие достижение требуемого результата, в том числе подсказки о входных переменных, влияющих на результаты расчета исследуемой выходной переменной, и рекомендуемых знаках их приращений. Аналитические способы, позволяющие получить результат без исследования пользователем поведения системы, основываются и на численных методах, в том числе реализованных в Excel, и на методах, обеспечивающих нахождение решений в общем виде (метод обращения [6]).

Система поддерживает формирования среды принятия решений, включающей рабочую таблицу, таблицу ограничений и графики зависимостей переменных от времени или от значений других переменных. Экранная форма режима для графического представления результатов представлена на рис. 4.

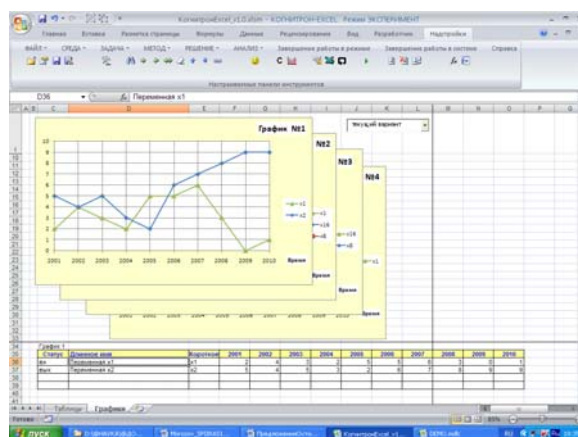


Рис. 4. Режим «Эксперимент»

В настоящий момент система находится в стадии реализации. Среда реализации MS Excel, язык реализации Visual Basic for Applications.

Выводы

1. Реализация методологии в среде MS Excel позволяет широкому кругу пользователей данного продукта получить доступ средствам и методам моделирования и поддержки принятия решений.
2. Ориентация на привлечение плохо формализуемых знаний экспертов повышает адекватность решений реальным условиям поставленной задачи, сокращает время принятия решений благодаря удалению посредников в лице математиков и программистов.
3. Наличие и возможность совместного использования методов, поддерживающих режимы аналитического и имитационного моделирования, позволяет существенно сократить время, необходимое для достижения требуемых результатов.

Литература

1. **Морозов В. П.** Методология и системы моделирования на основе алгоритмических сетей // X Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика-2006» («РИ-2006»), Санкт-Петербург, 24–26 октября 2006 г.: Труды конференции. СПб.: СПОИСУ, 2007. С. 112–118.
2. **Иванищев В. В., Марлей В. Е.** Введение в теорию алгоритмических сетей. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. 179 с.
3. **Иванищев В. В., Михайлов В. В.** Автоматизация моделирования экологических систем. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. 171 с.
4. **Иванищев В. В., Марлей В. Е., Морозов В. П.** Язык алгоритмических сетей: Препринт №63 ЛНИВЦ АН СССР. Л., 1984. 37 с.
5. **Иванищев В. В., Марлей В. Е., Морозов В. П.** Система автоматизации моделирования САПФИР-Искра. Основы построения системы: Препринт №99 ЛИИАН. Л., 1989. 63 с.
6. **Морозов В. П.** Задачи на вычисление при наличии ограничений. Метод обращения // Алгоритмическое моделирование, инструментальные средства и модели. СПб.: СПИИРАН, 1992. С. 112–137.

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. В. Рудометов (Новосибирск)

Введение

Компьютерное имитационное моделирование (ИМ) является мощным и широко распространенным методом исследования сложных систем, используемым практически во всех отраслях науки и техники. ИМ заключается в разработке имитационных моделей исследуемых систем и проведении имитационных экспериментов с этими моделями. Для автоматизации этих процессов существуют многочисленные системы и пакеты ИМ. Использование этих средств автоматизации требует от пользователя профессиональной подготовки в области ИМ.

В настоящее время возрастает потребность использования ИМ при проектировании, разработке, оптимизации технических систем и технологических процессов, информационных и управляющих систем в разных прикладных областях. Но отсутствие у потенциальных пользователей, являющихся специалистами в конкретных прикладных областях, профессиональной подготовки в области ИМ препятствует широкому использованию ИМ в этих областях.

Требования к системе имитационного моделирования технологических систем

Формальные требования к системе ИМ сформулируем применительно к **технологическим системам**.

Современная система имитационного моделирования технологических систем (СИМТС) должна удовлетворять следующим требованиям:

- ✓ иметь визуально-интерактивный интерфейс для создания и исполнения моделей;
- ✓ использовать графические средства для разработки и исполнения моделей;
- ✓ поддерживать быструю разработку моделей;
- ✓ быть ориентированной на специалистов предметных областей;
- ✓ иметь готовые к использованию библиотечные элементы для обеспечения быстрой сборки моделей;
- ✓ обеспечивать возможность разработки имитационных моделей пользователями, не являющимися специалистами в области ИМ;
- ✓ обеспечивать взаимодействие моделей с внешними системами;
- ✓ иметь возможность графической разработки модели в двумерном формате (2D) и визуализации исполнения модели как в формате 2D, так и в трехмерном формате (3D);
- ✓ представлять результаты моделирования в виде законченного анализа работы модели, не требующего дополнительной статистической и иной обработки.

Архитектура СИМТС

Понятие элементарной модели. Технологические системы (ТС) состоят из объектов технологического оборудования (ТО). Каждый объект технологического оборудования имеет свой тип (тип технологического оборудования). Функционирование ТС заключается во введении в систему продуктов производства, их обработки, и последующего вывода из ТС.

Элементарной моделью (ЭМ) назовем имитационную модель какого-либо типа технологического оборудования. **Экземпляр элементарной модели** представляет в

имитационной модели некоторый объект технологического оборудования в технологической системе.

Каждый объект технологического оборудования в ТС взаимодействует с некоторым множеством других объектов технологического оборудования в этой ТС. Это означает, что в СИМТС требуется создать аналог таких связей между экземплярами ЭМ. Эта связь может быть создана с использованием онтологии портов [7].

Важным свойством ЭМ является ее графическое представление. С помощью графического представления можно идентифицировать ЭМ в имитационной модели, а также отслеживать изменение состояния ЭМ в процессе работы имитационной модели.

Единицы технологического оборудования в исходной ТС могут иметь как встроенную логику своей работы, так и управляться с помощью некоторых управляющих программ. Поэтому в СИМТС требуется иметь возможность создавать модели этих управляющих программ. В силу своей специфики модели управляющих программ составляют отдельный, **управляющий уровень** в иерархии объектов СИМТС.

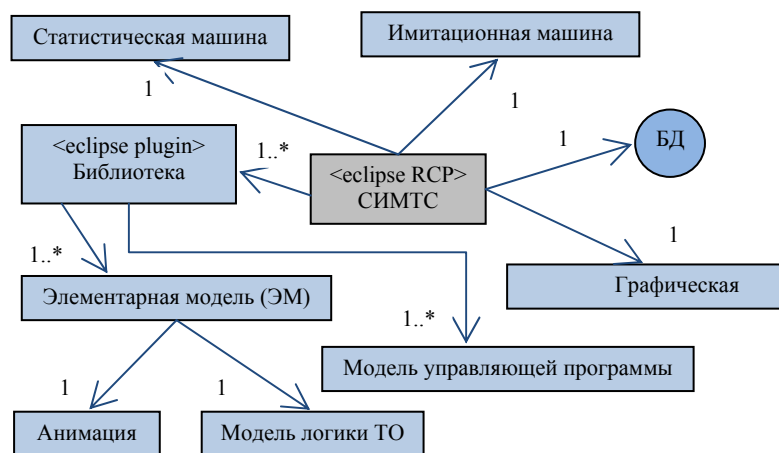


Рис. 1. Архитектура СИМТС

Основные компоненты архитектуры СИМТС (рис. 1):

1. Имитационная машина. Этот компонент предназначен в СИМТС для инкапсуляции аспектов ИМ. Могут использоваться различные подходы к созданию такой машины – классическое или распределенное ИМ и т.д. Все используемые инструменты и понятия ИМ должны быть реализованы именно в данном компоненте.

2. Графическая подсистема. Предназначена для графического представления имитационной модели. Используется как на этапе создания имитационной модели, так и на этапе ее исполнения.

3. Статистическая машина. Предназначена для сбора, анализа и представления статистических данных в процессе исполнения имитационной модели.

4. БД (база данных). Этот компонент является одним из способов обеспечения связи с внешними системами. В нем взаимодействие модели с внешними системами осуществляется путем обмена данными.

5. Библиотека. Является способом объединения нескольких элементарных моделей и моделей программ управления, относящихся к некоторой предметной области. Программный продукт СИМТС строится как совокупность нескольких библиотек элементарных моделей.

6. Элементарная модель и модель программы управления. Эти компоненты являются реализациями ЭМ и моделей управляющих программ ТС в СИМТС.

7. Анимация и модель логики ТО. Это основные части каждой ЭМ. Анимационная часть используется при визуальном создании имитационной модели и для отображения состояния ЭМ в процессе работы имитационной модели. Модель логики ТО является другой составляющей ЭМ и предназначена для моделирования поведения типа ТО, имитируемого данной ЭМ.

Система MTSS

Система MTSS (Manufacturing and Transportation Simulation System) ([1, 3]) реализована на основе изложенных выше требований и предложенной архитектуры. Для создания MTSS использована платформа Eclipse [5] и язык программирования Java [4].

Возможности системы MTSS заключаются в быстром создании имитационной модели специалистами в предметных областях, не знакомых с ИМ. Система MTSS определяет структуру элементарных моделей, следовать которой обязаны разработчики элементарных моделей. Система MTSS может подключаться к внешним системам с тем, чтобы имитационные модели имели возможность оперировать данными реальных систем или в свою очередь генерировать данные для реальных систем.

Важным элементом MTSS является реализация имитационной машины. Она выполнена как модификация системы Mera [2, 8]. Согласно архитектуре СИМТС, имитационная машина – это модуль, поэтому одна из возможностей среды MTSS как реализации архитектуры СИМТС – это возможность использования различных реализаций имитационной машины.

Интерфейс системы MTSS. Возможности быстрого построения имитационных моделей определяются интерфейсом пользователя системы (рис. 2).

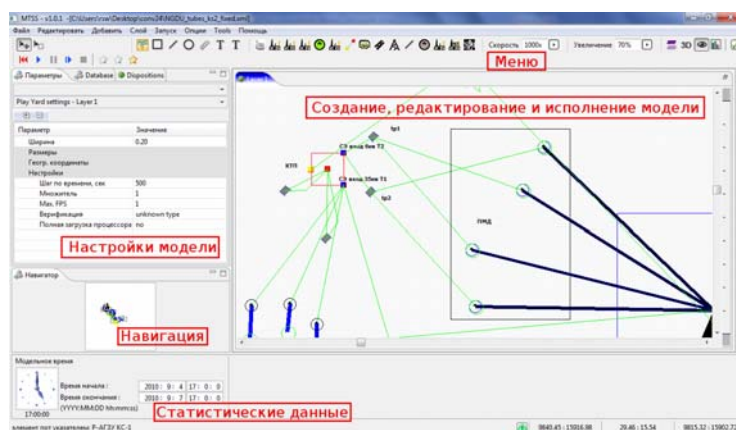


Рис. 2. Интерфейс пользователя системы MTSS

Возможности создания и использования имитационной модели

Имитационная модель собирается из готовых ЭМ путем их визуального соединения. Таким образом, процесс создания модели ускоряется и делается очевидным для пользователей, не знакомых с ИМ.

Порты в MTSS имеют графическое представление и физические координаты. Благодаря этому пользователь может визуально контролировать различные точки соединения ЭМ, визуально определяя корректность построения имитационной модели.

Порты в MTSS могут соединяться между собой путем визуального наложения друг на друга. При этом происходит коррекция местоположения экземпляров ЭМ, что приводит к более точному построению имитационных моделей.

При визуальном соединении портов информация о присоединенных портах сохраняется и может быть использована в работе имитационной модели для организации взаимодействия между различными экземплярами ЭМ.

Анимация в MTSS является асинхронной. Скорость заботы анимации регулируется параметром частоты смены кадров. Возможно полностью отключить анимацию в процессе имитационного прогона. Это позволяет имитационной модели не зависеть от скорости работы графической машины.

Скорость работы имитационной машины может регулироваться в широких пределах в процессе имитационного прогона. Скорость имитационных вычислений по желанию экспериментатора может быть установлена равной режиму реального времени, быть ускоренной или замедленной в произвольное количество раз по отношению к реальному времени.

Сбор статистики и ее представление происходят в течение имитационного прогона, и не требуют добавочных вычислений.

Контроль за исполнением имитационной модели проводится в основном визуально. Этому способствует наличие средств навигации по модели и управления скоростью и точностью имитационного эксперимента. Точность может регулироваться заданием шага имитационного эксперимента, скорости исполнения имитационной модели, использованием различных режимов исполнения имитационной модели (останов в произвольное время, переключение в пошаговый режим).

Специалист в предметной области не оперирует никакими инструментами и управляющими элементами, использующими термины ИМ (за исключением модельного времени).

Создание библиотек элементарных моделей. Система MTSS позволяет объединять ЭМ в библиотеки и собирать программные продукты ИМ как сочетание различных библиотек ЭМ. В каждую библиотеку, как правило, включаются ЭМ из какой-нибудь одной предметной области.

Элементарные модели создает специалист в имитационном моделировании. В своей работе он должен использовать стандартную схему создания имитационной модели [6]. Отличие состоит в том, что создается не имитационная модель всей технологической системы, а имитационная модель отдельного типа технологического оборудования.

Конкретный набор ЭМ в реализации зависит от имитируемой технологической системы и от задач ИМ.

Точная имитационная модель, которую будет строить пользователь, равно как и точный набор имитационных экспериментов, может быть не известна на этапе создания ЭМ, в силу специфики возможностей MTSS по созданию моделей неспециалистами в области ИМ. Поэтому создателям ЭМ приходится реализовывать заведомо более подробные алгоритмы в модели логики ЭМ. Это обстоятельство может серьезно осложнить создание ЭМ. Как правило, требуется детальное исследование исходных ТО, ТС и предметной области и очень детальная реализация различных аспектов модели, изначально не требуемых в постановке задачи. С другой стороны, такая детализация расширяет исходную задачу, позволяя специалистам в предметных областях использовать полученные ЭМ в более широком классе задач, чем в исходной постановке.

Команды и состояния ЭМ. В процессе разработки и эксплуатации MTSS был выработан подход к реализации логики ЭМ, позволяющий упростить и формализовать создание логической части ЭМ. Логическая часть ЭМ должна быть представлена в виде набора **состояний ЭМ**, переход между которыми задается **командами ЭМ**.

Состояние ЭМ – это набор действий, совершаемых ЭМ, абстракция, которая позволяет обозначить текущую активность ЭМ для того, чтобы в дальнейшем иметь возможность оперировать ею.

Команда ЭМ – это описание правил перехода из одного состояния ЭМ в другое. Команда содержит условие своего запуска, начальное состояние, и алгоритм перехода между некоторыми (или всеми) состояниями ЭМ.

Связь имитационной модели с внешними системами. В систему MTSS встроен интерфейс с системами баз данных с целью получения простого и универсального механизма связи с любыми внешними системами. Связь с внешними системами может использоваться для связи СИМТС с реальными программами управления, позволяя интегрировать СИМТС в реальные управляющие системы. И наоборот, модели управляющих программ могут передавать управляющие воздействия из СИМТС в реальные технологические системы, позволяя использовать модель как управляющую программу. И наконец, данные из реальной системы могут поступать в имитационную модель и отображаться с использованием графической части имитационной модели.

Заключение

В докладе сформулированы требования к современной системе имитационного моделирования технологических систем, рассмотрена ее архитектура и представлена система MTSS, созданная на основе этих требований и архитектуры.

Литература

1. **Окольнишников В. В., Рудометов С. В.** Использование среды имитационного моделирования TSS для решения задач управления технологическими процессами предприятий горнодобывающей промышленности // Труды ИВМ и МГ СО РАН. Сер. Информатика: Материалы Пятой азиатской международной школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем". Новосибирск, 2009. Вып. 9. С. 253–257.
2. **Рудометов С. В.** Система распределенного имитационного моделирования для MBC-1000/M // Труды Международной научно-методической конференции "Классический университет в российском образовательном пространстве" (к 90-летию Пермского государственного университета). Пермь, 2006. С. 82–84.
3. **Рудометов С. В., Окольнишников В. В.** Возможности среды имитационного моделирования TSS // Труды ИВМ и МГ СО РАН. Сер. Информатика: Материалы Пятой азиатской международной школы семинара "Проблемы оптимизации сложных систем". Новосибирск, 2009. Т. 9. С. 111–116.
4. **Flanagan D.** Java In A Nutshell: O'Reilly, 2005.
5. **Gamma E., Beck K.** Contributing to Eclipse: Principles, patterns, and Plug-Ins: Addison-Wesley Professional, 2003.
6. **Law A. M.** Simulation Modeling and Analysis (Fourth Edition): McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2006. 846 p.
7. **Liang V.-C., Paredis C.J.J.** A port ontology for automated model composition // Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. P. 613–622.
8. **Rudometov S. V., Okolnishnikov V. V.** Development of Distributed Simulation System // Proc of the Seventh International Conference "Parallel Computing Technologies (PaCT-2003)". Nizhni Novgorod, Russia, 2003. P. 524–527.

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИСПЫТАНИЙ ГТД

В. Н. Рыбаков, В. С. Кузьмичев (Самара)

Метод имитационного моделирования может рассматриваться как своеобразный экспериментальный метод исследования. От обычных прямых экспериментальных методов он отличается тем, что испытанию подвергается не сам объект, а реализованная на ЭВМ его имитационная модель.

При разработке авиационного двигателя одним из приоритетных направлений является создание виртуальной модели ГТД, которая охватывает весь его жизненный цикл. Из-за невозможности получения полностью адекватных моделей авиационных ГТД большая часть всех возникающих проблем решаются при помощи испытаний, которые проводятся на различных этапах жизненного цикла. Виртуальная лаборатория испытаний ГТД предназначена для имитации испытаний двигателя по определению основных эксплуатационных характеристик двигателей (дрессельных, скоростных, высотных и климатических) и является составной частью его виртуальной модели.

Проведение физических экспериментов по испытаниям авиационных ГТД – трудоемкий и дорогостоящий процесс, что значительно снижает количество проводимых испытаний. В связи с этим целесообразно сочетать натурные испытания ГТД с имитацией их испытаний на ЭВМ. Это позволит сократить объем испытаний, затраты на эксплуатацию стенда, а в процессе обучения существенно расширить количество потенциальных лабораторных работ и, таким образом, повысить качество подготовки специалистов.

В состав виртуальной лаборатории входят следующие основные компоненты: подсистема математического моделирования ГТД АСТРА; подсистема планирования эксперимента; подсистема имитации погрешностей измерений; подсистема идентификации математической модели; подсистема документирования; подсистема визуализации процесса испытаний; информационная подсистема.

Основу виртуальной лаборатории испытаний ГТД составляет автоматизированная САЕ-система АСТРА, разработанная в СГАУ. С её помощью реализованы модели различных типов и схем ГТД. Подробно система АСТРА описана в работе [1].

Подсистема планирования эксперимента предназначена для проведения виртуального эксперимента по нескольким планам: полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент, центральное композиционное планирование эксперимента (ортогональное и ротатабельное).

Например, при проведении эксперимента по получению высотно-скоростных характеристик применяют ротатабельный центрально-композиционный план 2-го порядка, включающий 15 опытов при различных сочетаниях факторов высоты H , скорости полета M и частоты вращения ротора n . Это позволяет уменьшить объем испытаний примерно в 3 раза [2].

Подсистема имитации измерений позволяет вносить в расчетные величины случайную погрешность измерения δ и отклонение параметров испытываемого двигателя от проектных значений Δ , имитирующее индивидуальные особенности каждого конкретного экземпляра двигателя, которые возникают при его изготовлении (например, погрешности изготовления лопаток, сборки ротора, камеры сгорания и т.п.).

Схема моделирования погрешности измерений и отклонений представлена на рис. 1.

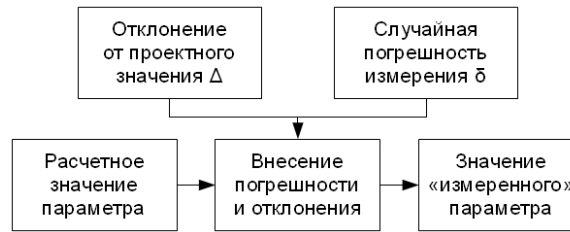


Рис. 1

Для получения значений параметров серии измерений реализуется цикл, на каждом этапе которого определяется новое значение случайной погрешности δ .

Подсистема идентификации математической модели. В настоящее время в практике создания двигателя чаще всего используются математические модели первого уровня. Это система нелинейных уравнений, описывающая рабочий процесс и совместную работу узлов двигателя и связывающая параметры двигателя P с параметрами его узлов Q и входными воздействиями X (внешними условиями и режимом работы):

$$P = f(Q, X).$$

Идентификация такой математической модели заключается в уточнении оценок параметров узлов Q по значениям параметров двигателя P , определенным в результате испытаний. При испытаниях двигателя количество (M) неизвестных параметров Q намного больше, чем измеренных параметров двигателя P .

Измеренное значение параметра $P_i^{\text{изм}}$ отличается от значения параметра, полученного при расчете по математической модели P_i на величину δ_i с учетом имитации конкретного экземпляра двигателя:

$$P_i - P_i^{\text{изм}} = \delta_{P_i}, \text{ где } P_i = P_i^{\text{расч}} + \Delta_i.$$

Если при испытании двигателя определяется N параметров, то можно составить систему нелинейных уравнений, состоящую из N уравнений:

$$\begin{cases} P_i - P_i^{\text{изм}} = \delta_{P_i} \\ P_{i+1} - P_{i+1}^{\text{изм}} = \delta_{P_{i+1}} \\ \dots \\ P_N - P_N^{\text{изм}} = \delta_{P_N} \end{cases} \quad (1)$$

Так как неизвестных величин Q больше, чем уравнений в системе, то эта система является незамкнутой.

Для решения системы уравнений L неизвестными параметрами узлов необходимо задаться:

$$L = M - N,$$

где M – общее количество неизвестных параметров узлов.

Для уменьшения количества неизвестных параметров L система уравнений дополняется аналогичными уравнениями, но для всей совокупности режимов работы двигателя или внешних условий, например $H_{\Pi i}$, $V_{\Pi i}$. Часть параметров, например КПД компрессоров η_{ki} , определяются характеристикой узла и совместной работой узлов.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{i,j} - P_{i,j}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i,j}} \\ P_{i+1,j} - P_{i+1,j}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i+1,j}} \\ \vdots \\ P_{N,j} - P_{N,j}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{N,j}} \\ P_{i,j+1} - P_{i,j+1}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i,j+1}} \\ P_{i+1,j+1} - P_{i+1,j+1}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i+1,j+1}} \\ \vdots \\ P_{N,j+1} - P_{N,j+1}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{N,j+1}} \\ \vdots \\ P_{i,k} - P_{i,k}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i,k}} \\ P_{i+1,k} - P_{i+1,k}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i+1,k}} \\ \vdots \\ P_{N,k} - P_{N,k}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{N,k}} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где $i = \overline{1, N}$ – количество измеряемых параметров на j -м режиме работы двигателя, $j = \overline{1, k}$ – количество режимов работы двигателя.

Для определения наиболее значимых параметров, которыми следует задаться, рассчитываются значения коэффициентов влияния каждого параметра $\delta P_j / \delta Q_i$.

Из всех неизвестных параметров узлов двигателя Q выбираются параметры с наибольшим значением коэффициента влияния $\delta P_j / \delta Q_i$ в количестве, равном количеству уравнений системы (2). Значения оставшихся неизвестных параметров задаются на основе статистических или экспериментальных данных, которые содержатся в базе данных. Таким образом, система уравнений (2) становится замкнутой – количество уравнений равняется числу неизвестных.

После решения системы уравнений (2) проводится проверка ограничений полученных значений параметров узлов Q . Если значение параметра выходит за допустимые пределы, то для данного параметра оно принимается равным его значению на границе предела, и этот параметр исключается из числа искомых. В число искомых параметров включается параметр, коэффициент влияния которого следующий по убыванию, и система уравнений снова становится замкнутой.

Далее находится её решение и проводится проверка ограничений на значения найденных параметров. Итерационный процесс решения системы нелинейных уравнений (2) проходит до тех пор, пока все найденные значения параметров узлов не будут лежать в заданном диапазоне.

В результате формируется математическая модель исследуемого экземпляра двигателя, согласованная с экспериментальными данными.

Схема алгоритма идентификации математической модели представлена на рис. 2.

Подсистема документирования предназначена для формирования протоколов испытаний и построения характеристик двигателя.



Рис. 2

Подсистема визуализации процесса испытаний обеспечивает мультимедийную (графическую и звуковую) имитацию испытаний - шум двигателя, имитацию движения рабочего тела по проточной части двигателя, графическое отображение измеряемых параметров и т.д.

Информационное обеспечение виртуальной лаборатории испытаний ГТД представляет собой совокупность баз данных: база данных (БД) математических моделей ГТД; БД исходных данных и результатов испытаний.

База данных математических моделей является составной частью подсистемы математического моделирования ГТД АСТРА, в которой хранится информация о математических моделях двигателей. Эти модели позволяют проводить проектный расчет двигателя и расчет его эксплуатационных характеристик.

База исходных данных предназначена для записи, хранения и редактирования информации о ГТД. Помимо информации о двигателе, в каждой записи хранятся исходные данные для расчета по математической модели двигателя.

База данных результатов испытаний обеспечивает запись, хранение и просмотр информации о проведенных ранее испытаниях: план эксперимента; отклонение параметров двигателя от проектного значения; протокол испытаний и др.

Информационная подсистема предназначена для хранения исходных данных и результатов экспериментов в виде базы данных. Это позволяет использовать исходные данные и результаты проведенного ранее эксперимента или же провести эксперимент заново по уже использованной ранее модели ГТД.

На рис. 3 представлена схема алгоритма работы виртуальной лаборатории ГТД.

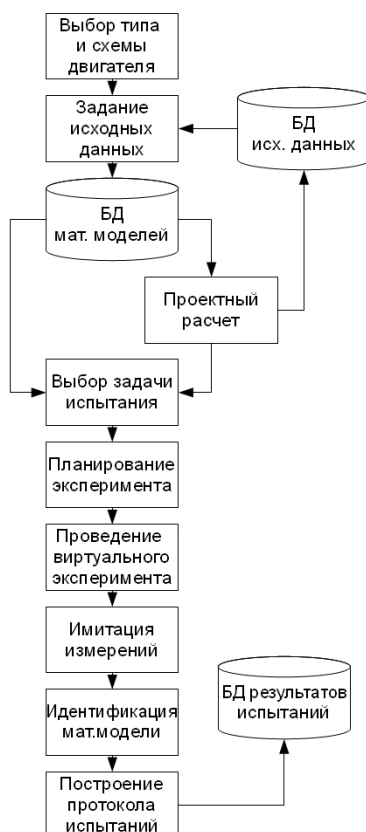


Рис. 3

После выбора типа и схемы двигателя из базы исходных данных исходные данные передаются в подсистему АСТРА, где совместно с математической моделью они составляют виртуальную модель двигателя. В зависимости от вида исходных данных (для проектного расчёта или расчёта выполненного двигателя) выбирается соответствующая математическая модель.

Если в базе исходных данных содержатся данные для расчёта выполненного двигателя, в подсистеме АСТРА выбирается задача испытаний, проводится расчёт характеристик (расчёт выполненного двигателя), виртуальный эксперимент и идентификация математической модели.

Если в базе исходных данных содержатся данные только для проектного расчёта, то проводится проектный расчёт, результатом которого являются данные для расчёта выполненного двигателя. Эти данные записываются в базу исходных данных и будут использованы при дальнейшем проведении виртуального испытания этого двигателя.

После проведения виртуального эксперимента формируется протокол испытаний, который записывается в БД результатов испытаний. На основе её данных строятся различные графические зависимости.

Литература

1. Крупенич И. Н., Кузьмичев В. С., Кулагин В. В., Ткаченко А. Ю. Автоматизированная система термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей // Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та. Ч. 2. 2006. №2(10). С. 66–73.
2. Испытания авиационных двигателей: Учебник для вузов / Под общ. ред. В.А. Григорьева и А.С. Гишварова. М.: Машиностроение, 2009. 504 с.: ил.

МОДУЛЬ ТРЁХМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ СИМ TRIAD.NET**К. В. Рябинин (Пермь)**

Визуализация результатов прогона модели является очень важной задачей при реализации современных систем имитационного моделирования. Наличие компонентов визуализации значительно увеличивают привлекательность системы для пользователя. Кроме того, визуализация процесса и результата моделирования упрощают такие этапы, как верификация и отладка модели, так как человеку проще оценить адекватность моделирования, опираясь на визуальный образ, а не на текстовые и числовые данные.

Визуальный образ, построенный на основе прогона имитационной модели, также является презентабельным, то есть пригоден для демонстрации другим людям, даже не являющимся специалистами в области имитационного моделирования. Это может быть полезно в том случае, если есть необходимость представить результаты моделирования людям, заинтересованным в изучении поведения моделируемой системы.

В работе [1] анимация (то есть визуализацию с отображением движений) выделяется как один из критериев сравнения систем имитационного моделирования. При этом отмечается, что модуль, отвечающий за анимацию, может быть как частью системы, так и внешним. В качестве критерия качества анимации отмечается не только её визуальная привлекательность и соответствие моделируемой предметной области, но и её интерактивность, то есть наличие у пользователя возможностей управления процессом визуализации. К таким возможностям относится, например, управление скоростью воспроизведения анимации.

Система имитационного моделирования Triad.Net

На кафедре математического обеспечения вычислительных систем Пермского государственного национального исследовательского университета была разработана система имитационного моделирования Triad [2]. Современной версией этой системы является Triad.Net [3], созданная на базе платформы Microsoft .Net. В состав Triad.Net входит графический редактор моделей, формирующий описания в виде XML-файлов.

Модуль графического расширения Snail Engine

Для визуализации процесса моделирования в системе Triad.Net было разработано приложение на базе модуля графического расширения Snail Engine [4, 5, 6].

Снимок экрана итоговой программы приведён на рис. 1.

Snail Engine является кроссплатформенным объектно-ориентированным модулем графического расширения, разработанным как надстройка над библиотекой стандарта OpenGL. Он предоставляет возможность работы с двумерной и трёхмерной сценами на уровне объектов, а не цепочек многоугольников, как это делается в OpenGL.

Иерархия классов Snail Engine описывает большое количество графических сущностей (например, камеру, трёхмерные модели и текстуры), а также инструменты управления этими сущностями: загрузки данных из файлов, организации очереди рендеринга и т. д. Модуль Snail Engine написан на языке C++ и подключается к прикладным программам на уровне исходного кода. Поэтому сами прикладные программы также должны разрабатываться с использованием C++.

В качестве примера для визуализации была взята классическая задача имитационного моделирования систем массового обслуживания – задача об автозаправочной станции.



Рис. 1. Визуализация имитационной модели автозаправочной станции

Архитектурные и технические особенности модуля визуализации

Разработанная на базе Snail Engine программа визуализации представляет собой отдельный и полностью независимый модуль, коммуникация которого с системой Triad.Net осуществляется через XML-файл. Решение использовать такой подход обусловлено сразу несколькими причинами. Во-первых, система Triad.Net написана на С# с использованием платформы .Net, поэтому интеграция с ней программы, реализованной на С++, затруднительна и нецелесообразна. Во-вторых, Triad.Net предоставляет возможность удалённого прогона модели, то есть поддерживает клиент-серверную архитектуру. В этом случае визуализатор должен находиться на клиентской машине для обеспечения хорошей производительности при отображении сцены в высоком разрешении, а значит, должен существовать отдельно от основной системы. В-третьих, Triad.Net является универсальной системой моделирования, то есть не привязан к терминам какой-либо конкретной предметной области, тогда как визуализатор создаётся под конкретную задачу. Используемая в нём сцена (которая по большей части описывается на уровне исходного кода) наилучшим образом подходит только для демонстрации моделирования в выбранной предметной области (автозаправочной станции). В случае изменения предметной области следует также внести коррективы в исходный код визуализатора (хотя большая часть кода может быть переиспользована) и изменить набор мультимедийных ресурсов (трёхмерных моделей и текстур, хранящихся во внешних файлах).

Кроме того, созданный визуализатор является кроссплатформенным, тогда как Triad.Net, в силу того, что он основан на платформе .Net, может быть запущен только под управлением ОС Windows. Таким образом, пользователь, имея уже сгенерированные XML-файлы, может просмотреть весь процесс моделирования в визуализаторе, без необходимости установки и запуска системы Triad.Net.

Для коммуникации системы Triad.Net и визуализатора был разработан специальный протокол общения на базе XML. В рамках системы Triad.Net он был реализован аспирантом кафедры математического обеспечения вычислительных систем Артёмом Шафрановым. Код, реализующий протокол, был помещён в информационные процеду-

ры системы, которые служат для сбора данных о процессе и результатах моделирования.

Файлы, получаемые от системы Triad, представляют собой модифицированные (изменённые в рамках разработанного протокола общения) журналы событий и имеют вид последовательных шагов, сгруппированных по признаку времени. Так как Triad является событийно-ориентированной системой моделирования, модельное время фиксируется только тогда, когда происходит изменение состояния системы: приход очередной заявки, помещение заявки в очередь и т. д. Промежутки времени, когда система неизменна, проходят мгновенно. Таким образом, изменение времени нелинейно.

Нелинейность времени реализована и в визуализаторе: каждое следующее событие происходит сразу после предыдущего, даже если между ними находится значительный промежуток модельного времени. При этом изменение счётчика модельного времени имеет скачкообразный характер.

В процессе решения задачи визуализации возникает так называемая проблема нулевого времени: ситуация, когда действие, которое в оригинале осуществлялось мгновенно, требует при визуализации определённых временных затрат. Это происходит, например, если необходимо отобразить перемещение заявки от одного пункта системы массового обслуживания к другому. При моделировании средствами Triad.Net считается, что такое перемещение происходит мгновенно, но для повышения привлекательности визуализации следует воспроизводить соответствующую анимацию движения. Следовательно, необходимо затратить время, не предусмотренное сценарием, получаемым от системы Triad.Net.

Чтобы избежать временных накладок, вся анимация воспроизводится вне модельного времени, т. е. следующее событие считывается из журнала только тогда, когда полностью отрисовано предыдущее. Такой подход является наиболее простым решением проблемы нулевого времени и гарантирует корректное отображение любой последовательности событий.

Ещё одним важным преимуществом, которое даёт такое решение проблемы нулевого времени, является лёгкость управления скоростью визуализации. Достаточно только изменить скорость воспроизведения соответствующих анимаций, и весь процесс отображения процесса моделирования ускорится, либо замедлится. В разработанной программе присутствует возможность динамического изменения скорости, что позволяет проматывать «скучные» места в процессе моделирования быстрее и замедлять воспроизведение при возникновении интересных ситуаций, либо же достаточно быстро демонстрировать модели с большим числом событий.

Созданная программа, как и любое приложение, основанное на модуле графического расширения Snail Engine, поддерживает стереоскопическую визуализацию, пригодную для просмотра в шлеме виртуальной реальности eMagin Z800 или затворных очках eDimensional 3D Vision.

Управление камерой на трёхмерной сцене осуществляется введением так называемого 3D-курсора, т. е. объекта, к которому привязана камера как к цели слежения. Положением этого курсора а также поворотом камеры вокруг него можно управлять при помощи мыши и клавиатуры. В программе реализованы подсказки, которые можно включить или отключить. Из этих подсказок пользователь может получить всю необходимую информацию об управлении.

Трёхмерная сцена представлена ландшафтом, небом и набором трёхмерных моделей, которые отвечают за изображение мелких статических деталей сцены и самих заявок, роль которых в выбранной предметной области играют автомобили. Все эти объекты реализованы при помощи средств, предоставляемых модулем Snail Engine.

Так, например, ландшафт строится по карте высот, которая загружается из файла. Эта карта представляет собой двумерное изображение, кодирующее высоты ландшафта яркостью пикселей. Затем на построенную по карте высот поверхность ландшафта накладывается текстура, также загружаемая из файла. Небо представляет собой куб, описанный вокруг сцены, на грани которого наложены соответствующие изображения. Трёхмерные модели загружаются из файлов формата 3DS, а затем на них также накладываются текстуры.

Помимо трёхмерных объектов использованы и двумерные, отвечающие за отображение различных индикаторов (например – индикатор высоты камеры над ландшафтом) и текста (для отображения модельного времени и справочной информации). Эти объекты также созданы при помощи средств, предоставляемых модулем Snail Engine.

Визуализатор представляет собой группу классов, наиболее важными из которых являются менеджер, обслуживающее устройство и клиент. Внутри менеджера собраны все методы работы со сценарием, получаемым от системы Triad.Net и управления поведением клиентов в соответствии с этим сценарием.

Визуализатор поддерживает работу с многоканальными устройствами. При этом число каналов определяется из мета-информации, находящейся непосредственно перед описанием процесса моделирования в XML-файле сценария. Класс обслуживающего устройства введён для хранения всей необходимой информации о многоканальном устройстве а также для управления его отображением.

Класс клиента отвечает за отображение заявки. При создании экземпляра этого класса случайным образом выбирается и загружается одна из доступных моделей автомобилей, что вносит разнообразие в визуализацию. Также этот класс реализует методы анимации движения заявки и организации очереди.

Анимация действий заявок сводится к их перемещению по сцене. Нетривиальным вопросом является определение траектории движения заявки. Получив уведомление от менеджера о том, какое действие следует произвести, заявка формирует массив контрольных точек, через которые проходит траектория движения. Первой точкой в этом массиве является текущее положение заявки, а последней – положение места назначения. Местом назначения может быть либо пункт удаления заявок со сцены, координаты которого известны (заданы в коде программы), либо точка конца очереди, координаты которой также известны заранее, либо канал устройства, координаты которого сообщает само устройство. Промежуточные точки выбираются в соответствии с конфигурацией ландшафта.

Через контрольные точки проводится ломаная линия, углы которой сглаживаются при помощи кривых Безье [6]. Полученная кривая и используется в качестве траектории плавного движения автомобиля.

Выводы

Разработанный программный продукт может быть использован для демонстрации возможностей системы Triad.Net и модуля графического расширения Snail Engine. Этот продукт является единственным на данный момент средством трёхмерной визуализации процесса имитационного моделирования в системе Triad.Net. Достоинствами по сравнению с аналогами для других систем имитационного моделирования являются свобода и межплатформенная переносимость созданного приложения, а также поддержка стереоскопической визуализации, совместимой со шлемом виртуальной реальности eMagin Z800 и затворными очками eDimensional 3D Vision. Недостатком же на настоящий момент является отсутствие каких-либо редакторов, которые позволили бы создавать сцены для визуализации задач в других предметных областях без про-

граммирования. Создание таких редакторов следует выделить в качестве направления дальнейшего развития средств визуализации для системы Triad.Net.

Литература

1. **Jalal Nikoukaran, Vlatka Hlupic, Ray J. Paul.** Criteria For Simulation Software Evaluation. In Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan, eds. P. 399–406.
2. **Mikov A. I.** Simulation and Design of Hardware and Software with Triad// Proc.2nd Intl.Conf. on Electronic Hardware Description Languages, Las Vegas, USA, 1995. P. 15–20.
3. **Миков А. И., Замятина Е. Б.** Проблемы повышения эффективности и гибкости систем имитационного моделирования // Проблемы информатики/ Новосибирск, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 2010. № 4(8). С. 49–64.
4. **Рябинин К. В., Полотнянщиков И. С.** SNAIL ENGINE: кроссплатформенный модуль графического расширения. URL: <http://rae.ru/forum2011/104/293> (дата обращения: 13.06.2011).
5. **Рябинин К. В.** Разработка кроссплатформенного объектно-ориентированного модуля графического расширения на базе спецификации OpenGL // Современные проблемы математики и её прикладные аспекты. Перм. гос. ун-т., 2010. С. 55.
6. **Рябинин К. В.** Проект Snail Engine: кроссплатформенный объектно-ориентированный модуль графического расширения на базе стандарта OpenGL. Актуальные проблемы механики, математики, информатики. Перм. гос. ун-т., 2010. С. 189.

СИСТЕМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТЕОДАНЫХ**Ю. Ю. Филь, В. В. Михайлов (Санкт-Петербург)****Введение**

В данной работе рассматривается система предварительной обработки метеоданных для проведения биоклиматических расчетов и построения биоклиматических полей. Биоклиматические поля используются в исследованиях пространственно-временной динамики биологических популяций, а также служат для анализа и прогнозирования изменений местоположения биологических популяций в зависимости от изменений климата и антропогенных воздействий.

Исходные данные системы предварительной обработки данных (далее – система) – замеры по метеофакторам, используемым в биоклиматических расчетах на модели теплопотерь животного [1]. Это скорость ветра, температура воздуха, влажность, глубина снежного покрова, общая и нижняя облачность, плотность снега и количество осадков. В данном случае, метеоданные поступают от сети метеостанций на Севере России, но система применима к любым метеоданным. Имеются данные как от станций, расположенных в глубине материка, так и от прибрежных станций.

Интервал усреднения данных – месячный.

Метеоданные разбиты на файлы, соответствующие отдельным станциям (названия файлов соответствуют номерам станций). Файлы расположены в каталогах, соответствующих отдельным измеряемым климатическим параметрам (скорость ветра, температура воздуха, и т. д.). В файлах содержатся массивы данных: строки соответствуют годам, в которые проводились измерения, столбцы – месяцам года.

Метеоданные, получаемые на выходе системы предварительной подготовки будут использованы в имитационной модели теплопотерь животного (северного оленя). Результаты экспериментов на этой модели являются основой для построения биоклиматических полей, позволяющих определить наиболее комфортные географические зоны для выпаса, благоприятные маршруты миграции и получать другие важные для скотоводческих хозяйств Дальнего Севера данные.

Рассмотрим процесс предварительной обработки данных.

Предварительная обработка данных

Предварительная обработка данных для модели теплопотерь животного состоит из нескольких этапов: форматирование исходных текстовых файлов, сортировка полученных массивов, нормировка элементов массивов, заполнение пропусков в данных.

Для того чтобы данные были пригодны к использованию в модели, написанной на языке MATLAB, необходимо привести их к формату, поддерживаемому этим программным пакетом: отдельные показания замеров (элементы массивов) должны разделяться пробелами или запятыми; символом, отделяющим целую часть от дробной, должна быть точка и т. д. Разбиение данных на отдельные файлы по метеофакторам и станциям не подходит для их использования в модели теплопотерь, отформатированные, не имеющие пропусков, данные необходимо отсортировать и сгруппировать.

В массивах метеоданных имеются пропущенные элементы, которые заполняются по стандартам метеослужбы девятками. Такие массивы не могут использоваться в биоклиматических расчетах и требуют корректировки. Рассмотрим систему подготовки данных.

Форматирование данных

Перед группировкой необходимо произвести форматирование данных.

Многие файлы были некорректно отформатированы: элемент, содержащий замер по климатическому фактору и элемент, содержащий пропуск в измерениях (равный 9.99, 99.9 или — в некоторых случаях — 1.0), часто не разделяются пробелом. При обработке данных человеком такая ошибка легко отслеживается, но при обработке на компьютере такие два элемента рассматриваются как один, что приводит к ошибкам. Поясним на примере:

рассмотрим данные по фактору "нижняя облачность" за 1973 год:

1.2 2.2 1.4 1.3 6.4 7.8 7.0 7.8 4.599.9 .6 .8 1973

В примере данные за октябрь и ноябрь не разделены пробелом и при загрузке данных в MATLAB они будут рассматриваться как один элемент.

Отформатировать текст можно с помощью различных инструментов: консольных текстовых редакторов (например, sed), текстовых процессоров, входящих в состав офисных пакетов (MS Word, OO Writer и пр.) и т.д. Из-за простоты редактирования и специфики задачи коррекция таких ошибок производится с помощью скрипта, написанного на языке программирования Perl.

Группировка

Исходная структура данных не подходит для биоклиматических расчетов, ведущихся по отдельным станциям: данные должны группироваться так же по станциям, но каждый файл, соответствующий станции, должен содержать все климатические параметры, сгруппированные по месяцам: строки соответствуют годам, а столбцы отсортированы по 8 климатическим параметрам; порядок расположения параметров строго определен (в соответствии со структурой входных данных модели теплопотерь). При этом первая группа из 8 столбцов соответствует январю, вторая – февралю и далее по месяцам года. Таким образом, исходные двумерные массивы данных должны быть преобразованы в трехмерные.

Для решения задачи группировки была разработана программа на встроенном языке MATLAB.

Работу программы можно разбить на 3 этапа.

1. Производится загрузка данных в MATLAB. Данные из текстового формата преобразуются в числовой и располагаются в массиве ячеек. Каждая ячейка, в свою очередь, содержит M ячеек, в которых хранятся двумерные массивы данных по замерам очередного климатического фактора: строки соответствуют годам, столбцы – месяцам.

2. После загрузки данных следует избавиться от столбцов, содержащих избыточную информацию – нумерацию по годам. Затем данные сортируются таким образом, чтобы первые M столбцов получившихся массивов (соответствующих станциям) содержали данные по всем замерам всех факторов за январь, следующие M – за февраль и так далее по месяцам года.

3. Отсортированные данные записываются на диск.

Пропуски в данных

Перед тем, как будут окончательно сформированы массивы входных данных для модели энергопотерь, необходимо заполнить имеющиеся пропуски в метео данных: в связи с тем, что данные собирались в течение длительного промежутка времени и на большой территории, для многих станций отсутствуют значения некоторых климатических факторов для отдельных месяцев или лет наблюдений. Пропуски в публикациях данных наблюдений месячного усреднения могут встречаться по нескольким причинам. К ним относятся: временное закрытие станции, неполнота наблюдений за месяц, браковка наблюдений. В исходных данных они помечаются как 99.9 или 999.9.

Одним из важных для биометрических вычислений климатических факторов является плотность снега. К сожалению, данные по этому параметру зачастую отсутствуют – начиная с 1990 года на большинстве станций замеры по нему отсутствуют вообще. Для того, чтобы установить зависимость между плотностью снега и другими имеющимися в наличии метеоданными, необходимо построить модель, определить, какие из факторов оказывают влияние на плотность снега и получить параметры модели.

Простейший вариант – линейный вариант модели:

$$x = a_0 + a_1 T + a_2 W + a_3 H + a_4 D + a_5 Cl + a_6 Cc + a_7 P .$$

где x – плотность снега, T – температура, W – скорость ветра, H – влажность, D – глубина снежного покрова, Cl – нижняя облачность, Cc – общая облачность, P – количество осадков, $a_0..a_7$ – настраиваемые параметры модели.

Для оценки настраиваемых параметров плотность снега должна рассчитываться на различных наборах метеоданных. Каждый набор – значения климатических факторов для некоторой метеостанции, конкретного месяца и года. Для каждого набора определяется невязка, равная разности между рассчитанной и фактической плотностью снега. В качестве критерия при настройке параметров выбирается среднеквадратичное отклонение по всем наборам метеоданных.

Счет можно организовать разным способом, но наиболее простой и эффективный – матричный вариант. При этом сразу можно рассчитать невязки, включив в правую часть уравнения фактическую плотность снега со знаком минус.

В этом случае критерий настройки параметров K будет определяться так:

$$D = AF, \quad S = D^T D, \quad K = \sqrt{\frac{S}{n}},$$

где A – вектор-столбец параметров, F – матрица метеоданных, D – вектор-столбец невязок, S – сумма их квадратов, K – критерий настройки параметров – скаляр, n – число данных в наборе (соответствует годам, для которых имеются замеры).

Матрица параметров включает дополнительный единичный столбец для учета фактической плотности снега. Матрица метеоданных будет включать кроме указанных выше факторов также столбец плотности снега и единичный столбец для свободного члена a_0 .

Подбор параметров модели производится с помощью встроенного в пакет AnyLogic оптимизатора OptQuest. Оптимизатор OptQuest для решения задачи оптимизации комбинирует эвристические методы, нейронные сети и математическую оптимизацию, которая состоит из нескольких последовательных прогонов модели с различными значениями оптимизационных параметров и нахождении оптимальных параметров для нашей задачи.

Для использования оптимизатора была построена модель в AnyLogic, соответствующая приведенной выше математической модели.

Из-за неоднородности данных перед их использованием в модели необходимо их нормировать.

Нормировка данных

Так как исходные метеоданные, участвующие в расчетах, неоднородны и их величины могут отличаться на порядок, оценить по коэффициенту степень влияния отдельного фактора на модель не представляется возможным. Поэтому для дальнейшего

использования в моделях данные необходимо пронормировать. Нормировка будет проводиться следующим образом:

$$X_{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{|x_{max} - x_{min}|}.$$

В результате набор данных будет представлять из себя числа от 0 до 1:

$$0 < M(i) < 1.$$

Модель плотности снега

В ходе расчетов с помощью OptQuest выяснилось, что наилучшее значение целевого функционала достигается на наборах данных T , H и D (температура воздуха, влажность воздуха и глубина снежного покрова соответственно), т.е. линейный вариант модели принял вид:

$$x = a_0 + a_1 T + a_2 H + a_3 D.$$

В таком случае матрица F будет выглядеть так:

$$F = \begin{pmatrix} 1 & T_1 & H_1 & D_1 & X_{f1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & T_N & H_N & D_N & X_{fN} \end{pmatrix}.$$

В среде AnyLogic матрица F формируется с помощью метода `set` из единичного вектора и значений переменных – векторов T , H и D .

Вектор B :

$$B = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_T \\ a_H \\ a_D \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Вектор-столбец невязок $Delta$ определяется как произведение матрицы F и переменной – вектора B .

Для контроля корректности полученных параметров данные за месяц, по которому производится настройка, разбиваются на 2 группы: одна будет использоваться для их настройки, вторая – для контроля. Например, для настройки берутся данные по январю за годы 1970–1986, для контроля – 1986–1990 за этот же месяц.

Для определения оптимальных значений параметров модели в среде AnyLogic создается оптимизационный эксперимент:

- в качестве целевого функционала указывается СКО рассчитанного в ходе эксперимента значения плотности снега и фактических значений, полученных от метеостанций; при расчете СКО используется метод `transpose` класса `matrix` для получения значений квадратов невязок;

- в качестве параметров выступают элементы вектора B , минимальное и максимальное значение устанавливается в пределах $[-1;1]$, в ходе повторных запусков оптимизационного эксперимента эти значения корректируются.

Для повышения точности были введены нелинейные члены.

В этом случае модель приняла вид:

$$x = a_0 + a_1 T + a_2 H + a_3 D + a_4 T^2 + a_5 H^2 + a_6 D^2 + a_7 TH + a_8 TD + a_9 HD .$$

Вектор B :

$$B = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_T \\ a_H \\ a_D \\ a_{T^2} \\ a_{H^2} \\ a_{D^2} \\ a_{TH} \\ a_{TD} \\ a_{HD} \\ -1 \end{pmatrix} .$$

Это усложняет задачу оптимизации, поэтому необходимо значительно увеличить количество прогонов модели. Но в результате достигается большая точность модели – значение целевого функционала меньше на порядок.

При анализе результатов становится понятно, что для расчета плотности снега для декабря и января можно рекомендовать модель, настроенную по данным января, для февраля, марта, апреля и мая – модель, настроенную по данным февраля (для оценки адекватности применения той или иной модели вычислялось СКО среднеарифметического плотности снега и ее расчетных значений для различных наборов месяцев). Параметры модели, полученные при ее настройке на данных за указанные месяцы, приведены в таблице.

Январь		Февраль	
a_0	0,2486	a_0	0,2679
a_T	0,091	a_T	0,026
a_H	0,063	a_H	0,0968
a_D	-0,076	a_D	0,0842
a_{T^2}	0,0509	a_{T^2}	0,0009
a_{H^2}	-0,0128	a_{H^2}	-0,1056
a_{D^2}	0,2574	a_{D^2}	-0,0428
a_{TH}	-0,037	a_{TH}	0,0117
a_{TD}	-0,2161	a_{TD}	-0,0104
a_{HD}	0,0391	a_{HD}	0,0003

Выводы

Компьютерные эксперименты показали, что максимальная абсолютная ошибка в расчетах ($|X_p - X_\phi|$, где X_p – плотность снега, полученная в результате расчета, X_ϕ – плотность снега, полученная со станций) равна 0,06 (минимальная – на порядок мень-

ше), что составляет около 20% от среднего значения плотности снега для контрольного месяца. Это немало, но для практического применения важна не абсолютная ошибка, а какая-либо статистическая характеристика, например среднеквадратическое отклонение, а оно составляет около 7,5% от среднего значения рассчитываемого параметра.

Из-за того, что наборов данных достаточно мало (всего 8), желательно осуществлять настройку параметров модели и расчет пропущенных замеров по наборам данных близкорасположенных станций. Также необходимо учитывать сезонные особенности: например весной могут быть оттепели, которые невозможно учесть по среднемесечной температуре, но которые могут влиять на плотность снега.

Литература

1. **Мордовин В. Ю., Михайлов В. В.** Модель энергозатрат животных и климат // Труды СПИИРАН / РАН. С.-Петербург. ин-т информатики и автоматизации; Под общ. ред. Р. М. Юсупова. Т. 2. Вып. 2. СПб.: Наука, 2005. С. 407–417.
2. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Кн. 1 /Пер. с англ. 2-е изд., перераб и доп. М.: Финансы и статистика, 1986.
3. **Тулупьев А. Л., Николенко С. И., Сироткин А. В.** Байесовские сети: логико-вероятностный подход. СПб.: Наука, 2006. 607 с.
4. **Тулупьев А. Л., Сироткин А. В., Николенко С. И.** Синтез согласованных оценок истинности утверждений в интеллектуальных информационных системах // Изв. высш. учебн. заведений: Приборостроение. 2006. №7. 20–26 с.

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ НА
ОСНОВЕ UML-ДИАГРАММ В СИСТЕМЕ СИМ-UML****Г. Н. Хубаев, С. М. Щербаков (Ростов-на-Дону)**

Известно, что на любой деловой процесс оказывает влияние множество случайных факторов. Именно поэтому для адекватного моделирования бизнес-процессов широко используются имитационные модели. Имитационная модель позволяет, во-первых, получать оценку затрат трудовых и иных ресурсов на исполнение деловых процессов, во-вторых, анализировать чувствительность для изучения влияния различных факторов на характеристики процесса, в-третьих, планировать и проводить имитационный эксперимент для оптимизации определяющих параметров делового процесса.

Рассмотрим особенности автоматизированной генерации имитационных моделей в системе СИМ-UML [3, 4]. Разработанная нами система позволяет реализовать интеграцию визуального и имитационного моделирования и с минимальными трудозатратами строить имитационные модели различных деловых процессов. Так, построив в редакторе системы визуальную UML-модель и задав на диаграмме количественные параметры анализируемого процесса, исследователь практически сразу может получить результаты имитационного моделирования. Кроме того, изменив структуру и количественные характеристики делового процесса на UML-диаграмме, исследователь может вновь провести имитационное моделирование и получить количественную оценку результатов реинжиниринга рассматриваемого процесса, например, с точки зрения затрат трудовых и материальных ресурсов. Важнейшим преимуществом системы СИМ-UML является возможность за счет автоматизации формирования программного кода многократно снизить затраты труда на построение имитационной модели.

Выбор унифицированного языка моделирования UML как основы для построения имитационных моделей обусловлен его известными преимуществами по сравнению с альтернативными средствами визуального моделирования:

- гибкостью и универсальностью. Средства языка можно использовать для решения задач анализа, моделирования и проектирования процессов и систем в различных предметных областях;
- наличием визуальных средств, позволяющих рассматривать моделируемую систему: с разных сторон (в том числе ее структурных и динамических аспектов); на разном уровне детализации; на разных этапах анализа, проектирования и разработки;
- возможностью расширения, что позволяет адаптировать средства языка для эффективного решения задач моделирования в конкретной области;
- объектно-ориентированными принципами построения языка, соответствующими специфике имитационного моделирования.

Интеграция визуального и имитационного моделирования на основе языка UML предполагает, что:

- 1) с помощью выбранного подмножества диаграмм языка UML и их элементов специфицируются структурные и поведенческие аспекты моделируемой системы;
- 2) количественные компоненты (переменные имитационной модели) описывают частотные, временные и вероятностные параметры процесса с учетом их случайного характера;
- 3) взаимосвязанная совокупность визуальных и количественных компонентов служит основой для проведения имитационного моделирования.

Реализация концепции интеграции визуального и имитационного моделирования требует формирования конкретной совокупности визуальных и количественных компонентов, используемых для моделирования – метамодели интеграции визуального

и имитационного моделирования. Мета модель определяет: состав используемых диаграмм языка UML и их элементов, способы их связи между собой; виды переменных; способы интеграции количественных и качественных компонентов модели; назначение компонентов модели для представления различных аспектов деловых процессов. На рис. 1 представлены основные компоненты модели в системе СИМ-UML.

В процессе автоматизированного синтеза имитационных моделей на основе диаграмм языка UML и количественных компонентов (переменных модели) формируется программный код имитационной модели, при этом каждому компоненту модели соответствует сгенерированный фрагмент программного кода. Структура диаграмм UML и взаимосвязи компонентов служат основой структуры программного кода имитационной модели. Например, диаграмма деятельности определяет последовательность и состав команд в соответствующей функции, представляющей деловой процесс. Реализован прямой перенос логики диаграммы, обеспечивающий существенное упрощение генерации кода. Дальнейшее построение программного кода предполагает его сборку из сгенерированных фрагментов [2].

Преимуществом предложенного подхода является возможность расширять состав компонентов и соответствующие элементы имитационной программы, не затрагивая основных принципов метода и алгоритмов его реализации.

Совокупность функций системы СИМ-UML можно условно разделить на несколько групп в соответствии с направлениями использования системы имитационного моделирования.

Первая группа «Построение количественных компонентов модели» включает следующие функции: построение перечня переменных модели; моделирование случайной суммы случайных величин; моделирование переменных, заданных таблично (дискретный или непрерывный эмпирический закон распределения); поддержка модельного времени и расчет интегральных значений по периоду моделирования (эти средства позволяют, например, оценивать NPV инвестиционного проекта); экспорт модели в MS Word для документирования.

Группа «Графическое конструирование UML-диаграмм» содержит функции: создание UML-диаграмм (встроенный графический конструктор системы позволяет построить диаграммы, связать их между собой и определить количественные параметры деловых процессов, представленных на диаграммах); поддержка дорожек, позволяющих определить исполнителей операций делового процесса и отследить затраты труда по исполнителям; моделирование параллельных ветвей исполнения процесса; моделирование вложенных процессов (блок подпроцесса, дающий возможность моделировать вызов дочернего процесса при исполнении родительского процесса); моделирование параметров процессов (предусмотрена возможность определения случайных количественных параметров делового процесса в виде переменных, например, объем поставки товара); проверка корректности диаграмм.

Группа «Формирование программного кода и проведение имитационного моделирования» объединяет функции: автоматическая генерация программного кода модели; планирование и реализация имитационного эксперимента и др.

Группа «Анализ результатов имитационного моделирования» включает функции: получение основных статистических характеристик выходного параметра (рассчитываются основные статистические характеристики: среднее значение, дисперсия, коэффициент вариации, минимальное и максимальное значения, асимметрия, эксцесс, мода или модальный интервал и др.); построение гистограмм значений выходных параметров моделирования для оценки формы закона распределения; сохранение результатов моделирования в виде переменной модели; экспорт результатов в MS Word и MS Excel для дальнейшей обработки и документирования.

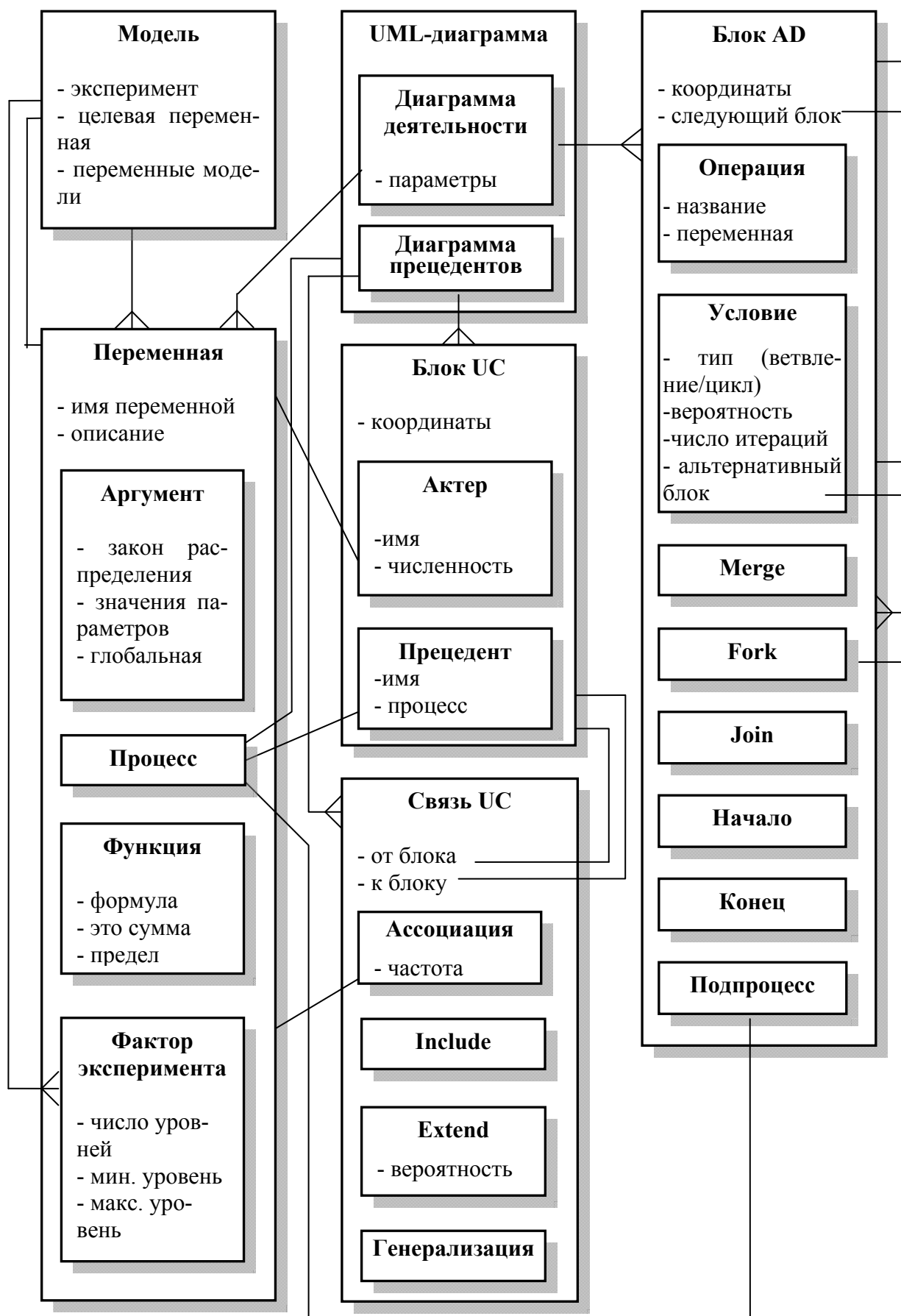


Рис. 1. Основные компоненты имитационной модели

На рис. 2 представлена экранная форма графического конструктора системы СИМ-UML, позволяющего строить UML-диаграммы деловых процессов и задавать их количественные характеристики. Показана диаграмма деятельности, определяющая операции делового процесса, исполнителей (с помощью плавательных дорожек), альтернативные варианты исполнения процесса. На диаграмме присутствуют блоки под-процесса, которые моделируют вызов дочернего процесса.

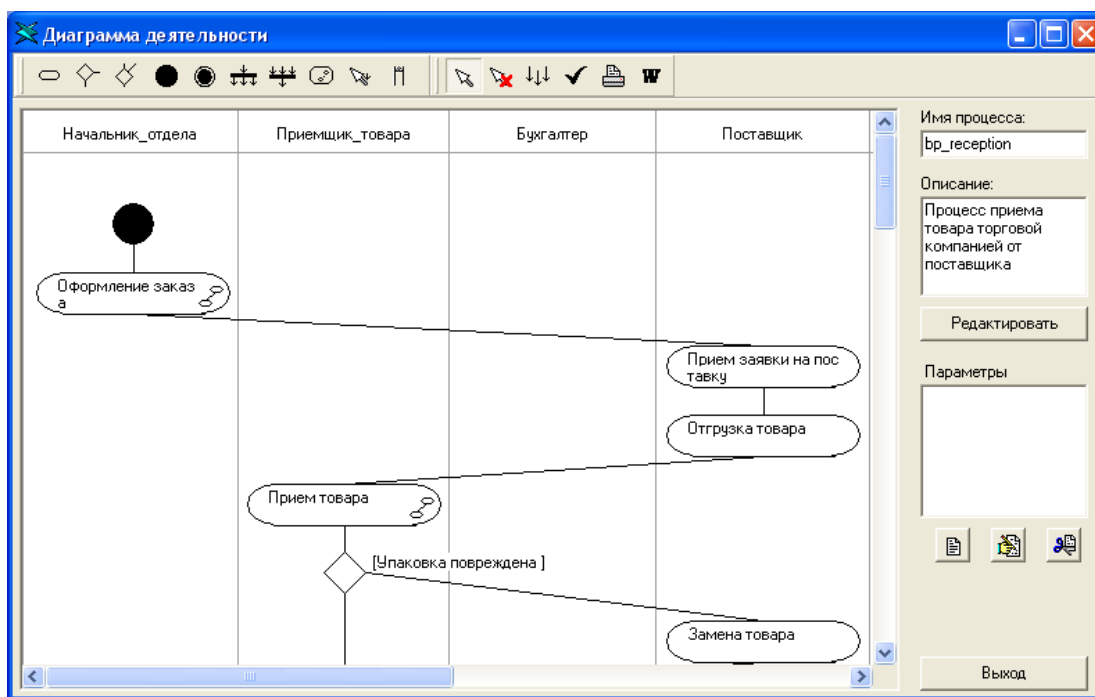


Рис. 2. Графический конструктор системы СИМ-UML. Построение диаграммы деятельности

На рис. 3 показаны экранные формы результатов имитационного моделирования для оценки затрат труда на исполнение деловых процессов.

Использование системы СИМ-UML для имитационного моделирования деловых процессов позволяет:

- ✓ оценивать затраты труда на выполнение деловых процессов по определенным участкам, отделам и исполнителям;
- ✓ обоснованно распределять трудовые ресурсы между отделами и участками работы;
- ✓ оценивать эффективность использования программных комплексов для автоматизации различных задач, определять перспективные направления автоматизации деловых процессов;
- ✓ выделять группы операций со значительной вариацией выходного параметра;
- ✓ выявлять функциональные операции и группы функциональных операций, характеризующиеся наиболее высокими затратами ресурсов;
- ✓ оптимизировать численность и персонала;
- ✓ исследовать эффективность деловых процессов с точки зрения затрат рабочего времени или стоимости, совершенствование деловых процессов;
- ✓ оценивать резервы снижения затрат ресурсов (трудовых, материальных, энергетических, финансовых) на исполнение управленческих и производственных процессов [1].

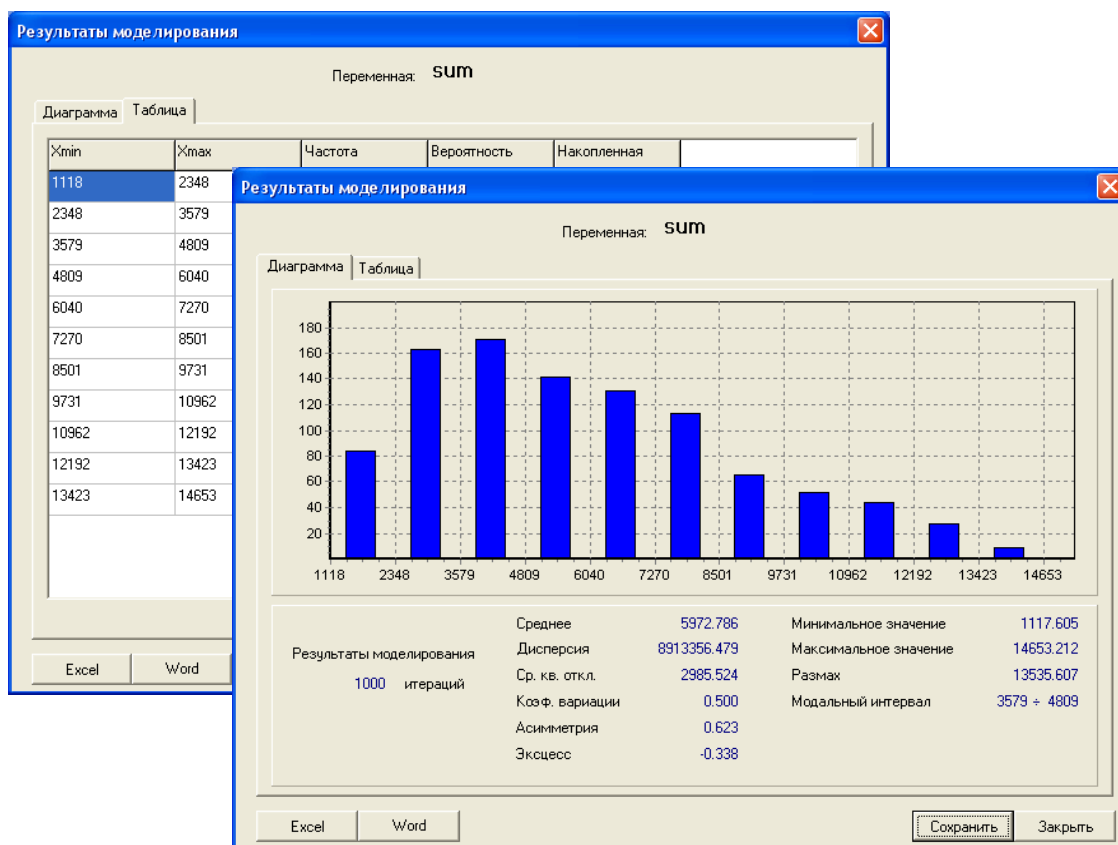


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования в системе СИМ-UML

Литература

1. Хубаев Г. Н. Ресурсоёмкость продукции и услуг: процессно-статистический подход к оценке // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 4.
2. Хубаев Г. Н., Щербаков С. М. Конструирование имитационных моделей в экономике и управлении. Монография. Ростов-н/Д.: РГЭУ «РИНХ», 2009. 176 с.
3. Хубаев Г. Н., Щербаков С. М., Рванцов Ю. А. Система автоматизированного синтеза имитационных моделей на основе языка UML «СИМ-UML» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2009610414. М.: РОСПАТЕНТ, 2009.
4. www.sim-uml.ru

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ СРЕДЫ CERTI ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РВС РВ**Е. В. Чемерицкий, Д. Ю. Волканов, Р. Л. Смелянский (Москва)****Введение**

В последнее время всё большее распространение получает стандарт распределённого имитационного моделирования High Level Architecture (HLA) [1]. В частности, появились системы, использующие данный стандарт для моделирования в реальном времени.

В Лаборатории вычислительных комплексов¹ уже долгое время существует программно-аппаратный комплекс «Стенд ПНМ» [2], предназначенный для полунатурного моделирования распределённых вычислительных систем реального времени (РВС РВ). Корни системы «Стенд ПНМ» уходят к параллельной системе моделирования «ДИАНА» [3], разработанной ЛВК в начале 1990-х, и служившей базой для проведения экспериментальных исследований в области имитационного моделирования. Последние успехи стандарта HLA в области моделирования в реальном времени [4] привели к постановке ещё одного эксперимента – построению новой системы моделирования, основанной на стандарте HLA и обладающей качествами системы «Стенд ПНМ».

Стандарт HLA включает в себя правила построения моделей и спецификации интерфейса инфраструктуры поддержки моделирования RTI (Run Time Infrastructure). Таким образом, перед разработчиками нового средства моделирования поставлена задача построения собственной реализации RTI, обладающей рядом дополнительных свойств, которые позволят использовать её для полунатурного моделирования РВС РВ. Однако доступное множество средств моделирования на основе стандарта HLA позволяет свести задачу построения новой RTI к доработке одной из существующих её реализаций.

В наибольшей степени для целей данного проекта подходит реализация RTI CERTI [5], разработанная Французской аэрокосмической лабораторией ONERA. В работе приводятся результаты исследования эффективности применения данного средства к решению простейших задач моделирования РВС РВ. Кроме того, проводится критический анализ его архитектуры и формулируется ряд предложений по её улучшениям, позволяющим адаптировать CERTI RTI для решения задач полунатурного моделирования и увеличить производительность системы.

Оценка производительности системы CERTI

Одной из основных численных характеристик, определяющих возможность использования конкретной системы для решения задач моделирования в реальном времени является среднее время обработки события. В подобных задачах важно гарантировать наступление каждого события строго внутри заданного директивного интервала. Таким образом, среднее время обработки события заведомо должно быть меньше верхней границы интервала. Кроме того, меньшее время обработки означает возможность дополнительного усложнения задачи и меньшую требовательность к вычислительным ресурсам.

В рамках проведённого экспериментального исследования среднее время обработки события было получено в виде отношения времени выполнения модели без ограничений реального времени к числу обработанных при этом событий. Выводы о применимости системы CERTI для решения имитационных задач в реальном времени бы-

¹ Лаборатория вычислительных комплексов факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

ли построены на основе сравнения её результатов с аналогичными показателями специализирующейся на них системы «Стенд ПНМ».

В качестве тестовых задач были использованы две простейшие модели из пакета тестирования системы «Стенд ПНМ». Обе задачи моделируют поведение комплекса, состоящего из терминала и вычислителя. Терминал итеративно передаёт вычислителю сообщения с единственным числовым параметром, уменьшающимся на единицу при каждой следующей пересылке, пока он не достигнет нулевого значения. В задаче «Test1» вычислитель лишь регистрирует поступившие сообщения. В задаче «Test2» вычислитель отвечает на каждое сообщение собственным сообщением с тем же телом, а терминал не передаёт новых сообщений, пока не получит соответствующее уведомление от вычислителя.

Для проведения экспериментов использовался комплекс из двух машин, на каждой из которых выполнялся свой компонент имитационной модели. При этом время работы каждого компонента измерялось с момента начальной синхронизации модели и до завершения выполнения этого компонента. Итоговое время выполнения модели считалось как среднее арифметическое от полученных значений.

Время выполнения моделей Test1 и Test2 системами моделирования CERTI и «Стенд ПНМ» в зависимости от числа переданных сообщений, мкс

Число сообщений	Test1		Test1 mod	Test2	
	CERTI	Стенд ПНМ	CERTI	CERTI	Стенд ПНМ
10	5	1	5	10	4
100	61	5	49	94	25
1000	611	49	487	924	249
10000	9297	499	4843	9123	2500
100000	1139762	5000	48575	90034	24999

Результаты эксперимента, приведённые в таблице, показывают, что система CERTI отстаёт от системы «Стенд ПНМ» в несколько раз. При этом отставание растёт линейно относительно числа сообщений. Лавинообразный рост времени выполнения задачи «Test1» системой CERTI объясняется особенностями её механизма продвижения модельного времени, его причины описываются в следующем разделе работы.

Подходы к описанию моделей в системах CERTI и «Стенд ПНМ»

Анализ полученных в ходе исследования результатов требует более детального изучения рассмотренных систем. Коренное отличие инфраструктуры CERTI RTI от среды выполнения системы «Стенд ПНМ» заключается в степени их параллелизма. Корни стандарта HLA, на основе которого была построена система CERTI, уходят к виртуальным средам – играм и тренажёрам, позволяющим географически разделённым участникам использовать общую модель игрового мира, обеспечивая при этом достаточную степень её интерактивности [6]. В отличие от CERTI, система моделирования «Стенд ПНМ» изначально создавалась как многомашинный комплекс, вычислительные узлы которого находятся в одном помещении.

Поэтому системы, к которым предъявлялись различные требования, были построены на различных принципах. В основу системы моделирования «Стенд ПНМ» была заложена идея общих часов – во время выполнения модели проводится высокоточная синхронизация вычислительных узлов комплекса. Отдельные участники моделирования при этом выполняются в соответствии с общесистемным временем. Таким образом, согласованность имитационной модели обеспечивается автоматически.

Идея использования существенно удалённых узлов не позволяет применить аналогичный подход в системах, реализующих стандарт HLA. В соответствии с его спецификациями отдельные участники моделирования должны использовать своё собственное модельное время, называемое *логическим временем*. Логическое время продвигается участниками моделирования независимо друг от друга с помощью сервисов инфраструктуры RTI. При этом задача поддержания модели в согласованном состоянии решается внутри RTI с помощью одного из распределённых алгоритмов синхронизации [6]. Система CERTI предлагает на выбор два таких алгоритма [7].

Описанные подходы продвижения времени обладают своими сильными и слабыми сторонами, и выбор лучшего из них существенно зависит от решаемой имитационной задачи. Использование распределённых алгоритмов синхронизации требует больших накладных расходов. Кроме того, при неосторожном использовании данный механизм может привести к значительному падению производительности. Например, этим объясняются столь плохие результаты системы CERTI на задаче «Test1». В данной задаче терминал не зависит от внешних факторов, поэтому он неограниченно продвигает своё модельное время и мгновенно забрасывает RTI сообщениями. Инфраструктура не успевает обрабатывать поступающий поток сообщений и накапливает их в соответствующем буфере. С ростом размера буфера манипуляции с его участием требуют всё больше ресурсов, поэтому обработка сообщений замедляется, а рост буфера, напротив, ускоряется. В итоге лавинообразно растёт время выполнения модели. Однако описанная ситуация легко исправляется с помощью замедления терминала или ограничения размера буфера – время выполнения изменённой модели приведено в колонке «Test1 mod».

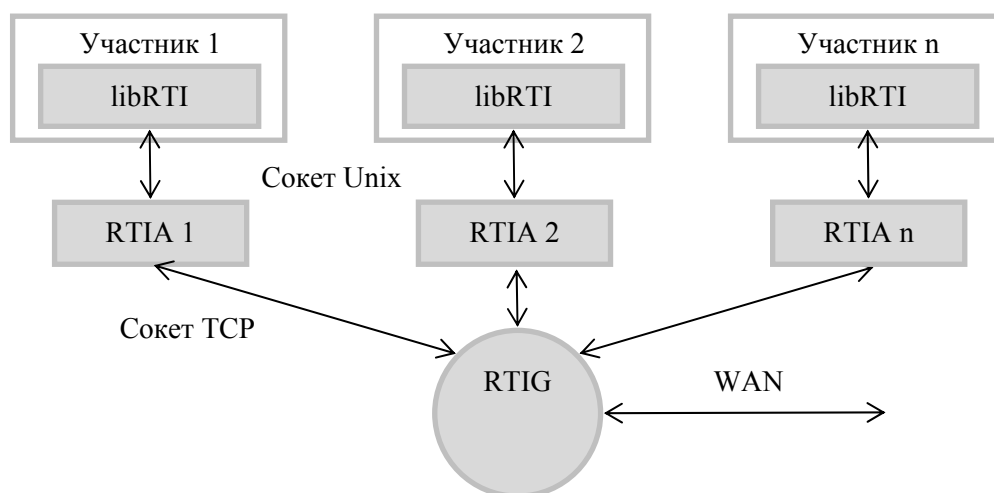
С другой стороны, отказ от идеи общего времени на более сложных реальных задачах часто приводит к росту производительности за счёт упреждающего выполнения инструкций. Например, если бы терминал совершал сложные вычисления после передачи каждого пятого сообщения, то опережение остальных участников моделирования позволяло бы ему рассчитывать на большее процессорное время.

Целью данной работы, однако, является изучение возможности построения средства для решения задач моделирования PBC PB на основе конкретной реализации стандарта HLA – CERTI. Поэтому целесообразно искать причины отставания CERTI от системы «Стенд ПНМ» не столько в разнице используемых системами подходов к построению моделей, сколько в архитектуре её реализации.

Архитектура CERTI RTI

Распределённая инфраструктура CERTI RTI состоит из трёх компонентов: процесса RTI Gate (RTIG), хранящего состояние модели; множества процессов RTI Ambassador (RTIA), каждый из которых контролирует состояние конкретного участника моделирования и запускается на той же машине, что и его подопечный; и библиотеки libRTI, связывающей участников с их процессами RTIA. Обмен данными между процессами RTIG и RTIA осуществляется через сокеты протокола TCP, а между RTIA и участником моделирования – через сокеты UNIX (рисунок).

Большая часть сервисов RTI реализуется процессом RTIG, в то время как остальные компоненты служат главным образом для его взаимодействия с остальными компонентами модели. Основным достоинством такой централизованной архитектуры является простота реализации сервисов и служб RTI – хранение полного состояния модели внутри процесса RTIG позволяет не заботиться о синхронизации отдельных компонентов RTI и сосредоточиться непосредственно на описании алгоритмов. Данная особенность позволила CERTI стать популярной исследовательской базой для проверки новых веяний в области имитационного моделирования на практике [5].



Архитектура RTI реализации CERTI

К сожалению, простота архитектуры CERTI RTI пагубно сказывается на её показателях производительности. Сильная централизация приводит к сосредоточению всей нагрузки на единственном вычислительном узле и не позволяет использовать свободные ресурсы других узлов. Исследования некоторых других RTI показывают, что архитектура RTI с большей степенью автономности её локальных компонентов способна обеспечить существенно лучшие результаты [8]. Например, в описанной реализации RTI любая передача данных между участниками моделирования, будь то модельные данные или информация, необходимая для корректной работы RTI, всегда осуществляется через процесс RTIG. При этом поступающие модельные данные никак не обрабатываются, лишь создавая дополнительную нагрузку на центральный компонент RTI: они перегружают канал передачи данных, ведущий к процессу RTIG, усложняют обработку поступающих сообщений и требуют использования дополнительной памяти для своего хранения. Если бы локальные процессы RTIA знали о существовании друг друга, они могли бы передавать модельные данные напрямую между собой, перераспределяя нагрузку между вычислительными узлами более равномерно.

Ещё больше снизить нагрузку на процесс RTIG можно с помощью логической декомпозиции решаемой задачи. Разделив участников моделирования на группы, исходную задачу можно представить как совокупность задач моделирования отдельных групп и синхронизации этих групп между собой. Таким образом, становится понятной идея построения RTI с каскадной архитектурой: нижний каскад составляют вспомогательные подсистемы для решения выделенных подзадач, верхний каскад – основная система, синхронизирующая работу вспомогательных. При этом группы можно выбрать так, чтобы минимизировать их взаимодействие между собой, тем самым распределив нагрузку между вспомогательными системами моделирования. Кроме того, каскадная архитектура даёт возможность индивидуальной настройки каждой из выделенных подсистем: например, выбора более подходящего алгоритма временной синхронизации, ограничения размера буферов сообщений или отключения неиспользуемых сервисов RTI.

Другой проблемой описанной архитектуры является неэффективный механизм обмена данными между участником моделирования и соответствующим ему процессом RTIA. Так как данные передаются в виде сообщений через сокет UNIX, то требуется их дополнительная обработка – сериализация параметров перед отправкой сообщения и их декодирование после его получения. Лучшим решением данной проблемы, видимо,

может быть замена полновесного процесса RTIA дополнительным потоком управления внутри соответствующего участника моделирования. При этом библиотека libRTI и процесс RTIA будут находиться в одном адресном пространстве, автоматически снимая задачу дополнительной обработки передаваемых данных. Кроме того, взаимодействие на уровне потоков может быть организовано эффективнее, чем на уровне процессов.

Выводы

Результаты, показанные реализацией CERTI RTI на простейших тестовых задачах, в несколько раз уступают результатам системы «Стенд ПНМ» и не позволяют использовать её для решения диапазона задач полунатурного моделирования РВС РВ, существующего в ЛВК, без предварительных модификаций. Однако отставание не является критическим. Анализ архитектуры CERTI показывает, что показатели её производительности могут быть значительно улучшены с помощью применения более эффективных способов передачи данных и перераспределения функциональности между компонентами RTI. Таким образом, на основе системы CERTI может быть построено средство для эффективного решения задач моделирования РВС РВ. В дальнейшем планируется доработать CERTI в указанных в работе направлениях.

Литература

1. Simulation Interoperability Standards Committee of the IEEE Computer Society IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) Federate Interface Specification. 2000.
2. **Балашов В. и др.** Стенд полунатурного моделирования для разработки встроенных вычислительных систем реального времени / В. Балашов, А. Бахмутов., Д. Волканов, Р. Смелянский, М. Чистолинов, Н. Ющенко // IV Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «ИММОД-2009». Сб. докладов. СПб., 2009. С. 215–219.
3. **Smeliansky R. L., Bakhmurov A. G.** DYANA: An Environment for Embedded System Design and Analysis // In Proceedings of 32-nd Annual Simulation Symposium, San Diego, California, USA, 1999.
4. **Adelantado M., Siron P., Chaudron J.-B.** Towards an HLA Run-time Infrastructure with Hard Real-time Capabilities // Proceedings of International Simulation Multi-Conference, Ottawa, Canada, 2010.
5. **Noulard E. Rousselot J.-Y.** CERTI, an Open Source RTI, why and how // Spring Simulation Interoperability Workshop. San Diego, USA, 2009.
6. **Fujimoto R.** Parallel and Distributed Simulation Systems, 2000.
7. **Chaudron J.-B., Noulard E., Siron P.** Design and model-checking techniques applied to real-time RTI time management // Proceedings of 2011 Spring Simulation Multiconference – SpringSim'11, Boston, USA, 2011.
8. **Malinga, L and Le Roux.** HLA RTI performance evaluation // European Simulation Interoperability Workshop, Istanbul, Turkey, 13–16 July, 2009. P. 1–6.

**БИБЛИОТЕКА ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЛОГИСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ****В. Е. Черненко, А. А. Малыханов (Ульяновск)****Актуальность имитационного моделирования логистических сетей**

Возрастающая конкуренция на рынке потребительских товаров и логистических услуг обуславливает необходимость повышения эффективности работы коммерческих компаний. Проблемы логистики в основном связаны с низким качеством выполнения транспортных, складских и организационных функций [5].

Разумеется, проблемы, связанные с управлением логистикой, не новы, и многие из них успешно решаются, в том числе и с применением методов математического моделирования. Так, существует целый класс инструментов [1, 3], основанных на решении оптимизационных задач с помощью методов линейного, целочисленного и смешанного программирования.

Однако в практике выполнения консультационных проектов в сфере транспортной логистики встречаются задачи, которые не укладываются в классические концепции оптимизационных моделей. В частности, одной из таких задач является повышение эффективности управления парком транспортных средств. Решение этой задачи требует учета алгоритмов диспетчеризации транспорта, формирования сборных грузов и т.п. Имитационные модели способны учитывать подобные детали за счет возможности выбирать уровень декомпозиции каждого элемента модели. Но следует помнить, что в случае использования имитационных моделей от полноценной оптимизации приходится отказываться в пользу сценарного анализа.

Специальный инструментальный для имитационного моделирования логистических сетей не сложился [6], и поэтому используются средства имитационного моделирования общего назначения, такие как Arena, ProModel, AnyLogic и другие.

Потребность в разработке библиотеки

Опыт создания имитационных моделей логистических сетей показывает, что разработчикам часто приходится решать задачи, которые, во-первых, не связаны напрямую с логикой моделирования, и, во-вторых, достаточно трудоемки в реализации. К таким задачам, «кочующим» из проекта в проект, относятся:

- загрузка и хранение информации о географических объектах (населенных пунктах, административно-территориальных единицах, автомобильных и железных дорогах и т. п.) в виде структурированного набора данных с возможностью произвольного доступа к ним, например, при реализации каких-либо алгоритмов имитационной модели;
- получение и использование дополнительной информации о географических объектах, хранящейся в виде их атрибутов. Например, для городов иногда важно использовать в логике модели такие атрибуты, как численность населения, площадь и принадлежность региону;
- представление информации о транспортных сетях в виде графа с возможностью, например, выполнять поиск кратчайшего пути между населенными пунктами, расчета расстояния и моделирования объезда недоступных участков дорог;
- динамическое отображение элементов карты в зависимости от состояния модели (раскраска регионов по объемам поставок, отображение интенсивности использования дорог и т. п.)

Потребность во всех этих функциях обуславливает целесообразность совмещения разнородных данных, полученных из нескольких источников, о некотором участке

территории. Поэтому для поддержки имитационного моделирования логистических сетей было предложено объединить в единую объектную модель и совместить следующие данные:

- графическое изображение карты местности,
- иерархию географических и административных объектов, расположенных на местности, с указанием некоторых важных для моделирования свойств объектов,
- сведения о транспортных путях в виде графа, пригодного, например, для вычисления оптимальных маршрутов и определения циклов.

Некоторое подобие такой интеграции данных можно наблюдать в GPS-навигаторах, однако эти данные недоступны для использования в имитационных моделях.

Реализация библиотеки

Комплекс средств поддержки имитационного моделирования логистических сетей был реализован в виде библиотеки для среды AnyLogic 6 [4], так как эта среда обладает следующими особенностями, существенными для реализации библиотеки:

- возможность расширения с помощью создания библиотек для последующего использования при создании моделей;
- поддержка применения нескольких подходов к имитационному моделированию в рамках одной модели;
- гибкая система визуализации моделей.

Исходя из требований к библиотеке, а также с учетом особенностей среды AnyLogic была разработана структура библиотеки моделирования логистических сетей, изображенная на рис. 1.

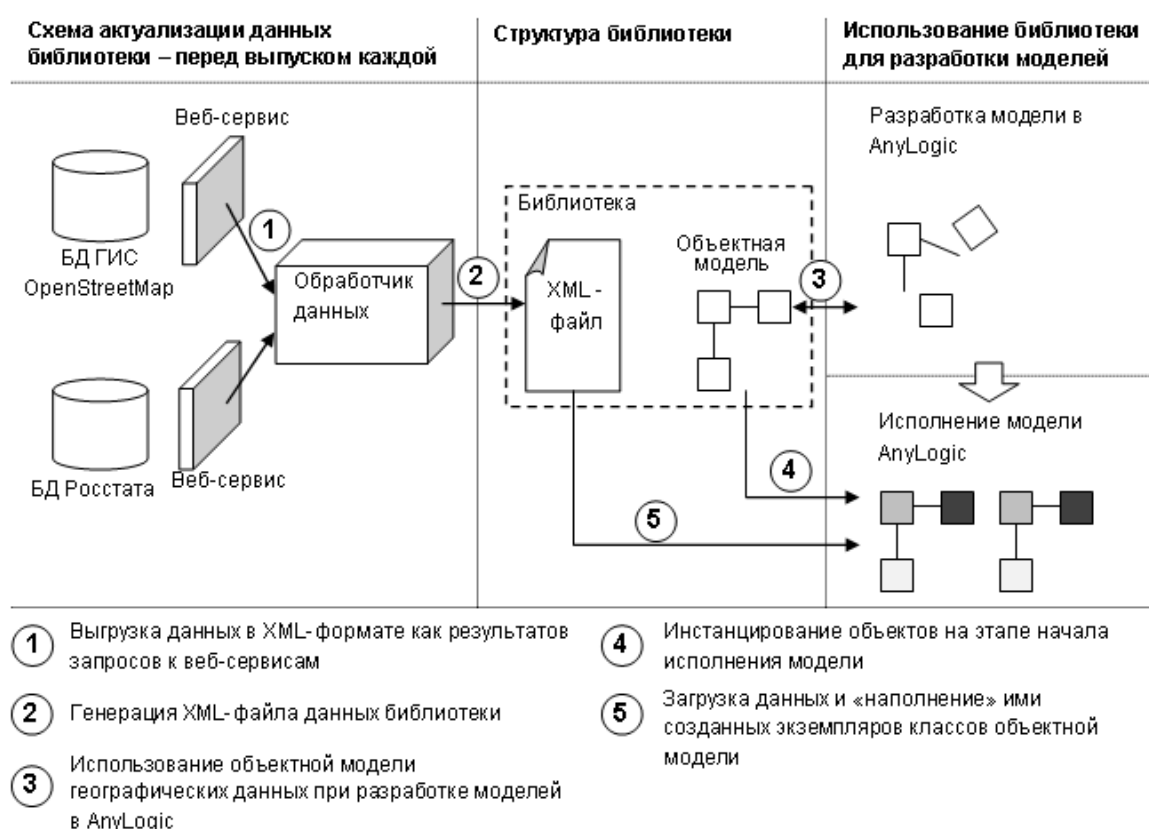


Рис. 1

Географические данные для библиотеки (контуры регионов, координаты городов и т.п.) были взяты из открытой геоинформационной системы OpenStreetMap [2]. Дополнительная информация о географических объектах (численность населения городов, площади регионов и т.п.) была взята с официального сайта Росстата [7]. Сопоставление объектов с координатами на карте производилось автоматизировано с помощью веб-сервиса геокодирования Google. Результатом обработки этих данных стало их структурированное представление в XML-файле.

На этапе разработки модели библиотека предоставляет разработчикам объектную модель, позволяющую оперировать с элементами карты. Пример использования объектной модели, предоставляемой библиотекой, показан на листинге 1 на языке программирования Java – внутреннем языке среды AnyLogic. В этом примере определяется ближайший к текущей точке **p** город с населением более 200 тыс. человек и прокладывается маршрут **r** из текущей точки к этому городу.

Листинг 1. Пример использования объектной модели библиотеки

```
Point p = agent.getCurrentPoint();
City foundCity = null;
for( City city : map.getAllCities() ) {
    if( foundCity == null
        || city.getPopulation() > 200000
        && p.distanceTo( city.getPoint() ) < p.distanceTo( foundCity.getPoint() ) ) {
        foundCity = city;
    }
}
Polyline r = map.getRoadGraph().findMinRoute( agent.getCurrentPoint(), foundCity.getPoint() );
```

На этапе исполнения моделей библиотека загружает данные о географических объектах из XML-файла, «населая» этими данными экземпляры классов объектной модели.

Отдельным модулем библиотеки является множество классов для работы с графами, которые реализуют наиболее часто используемые алгоритмы (например, поиск кратчайшего пути и поиск циклов). Особенностью библиотеки является то, что она предоставляет гибкий программный интерфейс для задания весов вершин и ребер графов. По умолчанию веса ребер равны длинам соответствующих участков маршрутов. Однако при необходимости можно задавать любые значения весов, зависящие, например, от типа дорожного покрытия, времени года, количества транспортных средств на данном участке и других моделируемых факторов.

Пример использования библиотеки

Для иллюстрации задач, на решение которых ориентирована разработанная библиотека, приведем пример, который является упрощенным вариантом модели, разработанной в рамках одного из консультационных проектов.

Задача проекта – сравнить эффективность стратегий управления парком грузовых машин в транспортно-экспедиционной компании. В рамках проекта также необходимо выбрать стратегию, обеспечивающую лучшие финансовые и операционные показатели для компании. Методология решения поставленной задачи состоит в сравнительном анализе эффективности стратегий управления автопарком на основе имитационного моделирования конкуренции двух компаний: «красной» и «синей». Грузовики синей компании дожидаются очередного заказа в городе, в котором они находятся. Грузовики красной компании могут ездить за заказами в другие ближайшие города.

В модели производится расчет суммарного общего и порожнего пробега всех грузовиков первой и второй компании. Для прокладки маршрута выбирается кратчайший путь по существующим автомобильным дорогам федерального и регионального

значения. Процесс моделирования визуализируется на карте европейской территории России. Визуализация модели является интерактивной и позволяет просматривать информацию о транспортных средствах и заявках на перемещение грузов. Внешний вид пользовательского интерфейса модели показан на рис. 2.

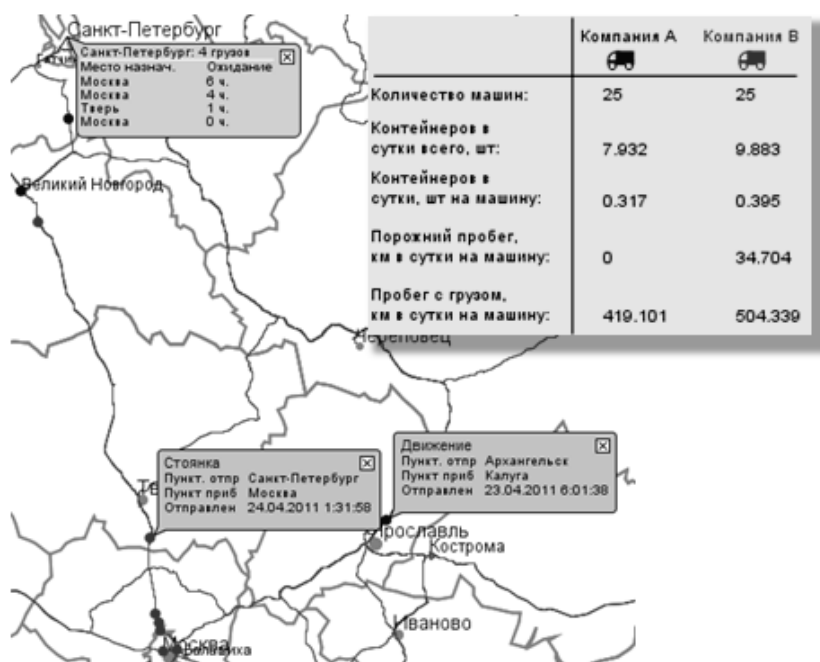


Рис. 2

Так, видно, что после моделирования периода длительностью 30 дней порожний пробег грузовиков красной компании составляет 34704 километра, что составляет 6,9% от общего пробега. В то же время политика красной компании позволяет перевести на 24% больше грузов, располагая тем же количеством грузовиков.

В выполненном коммерческом проекте разработанная библиотека позволила реализовать в модели следующие возможности, необходимые для решения поставленной заказчиком задачи:

- учет типов дорог (трассы, местные, региональные и т.п.) при прокладке маршрута;
- моделирование более сложных политик управления автотранспортом;
- добавление любых дополнительных точек (порты, аэропорты и т.п.) и маршрутов (планируемые дороги) в транспортную сеть;
- расчет финансовых показателей работы (с учетом стоимости бензина, ночевки, ремонта, поломок и т.п.)

Заключение

Разработанная на платформе AnyLogic библиотека для имитационного моделирования логистических сетей упрощает создание и визуализацию моделей за счет предоставления разработчикам единой объектной модели, объединяющей многие аспекты географических данных. База данных библиотеки содержит информацию о транспортной инфраструктуре (дорогах, населенных пунктах, железных дорогах и станциях) России.

Планируется развивать работу по следующим основным направлениям:

- реализация автоматизированного обновления базы данных с помощью геоинформационных веб-сервисов;

- дополнение библиотеки информацией о транспортной инфраструктуре зарубежных стран;
- добавление в объектную модель и базу данных новых типов инфраструктурных объектов (в первую очередь, морских портов и аэропортов);
- проработка возможности добавления существующих судоходных маршрутов и авиационных коридоров.

Литература

1. Cast – Supply chain software // Barloworld URL:
<http://www.barloworldscs.com/home/solutions/cast-supply-chain-modelling/cast-software.aspx> (дата обращения: 09.09.2011)
2. OpenStreetMap URL: <http://www.openstreetmap.org> (дата обращения: 09.09.2011).
3. Oracle Strategic Network Optimization // Oracle URL:
<http://www.oracle.com/us/products/applications/056991.pdf> (дата обращения: 09.09.2011)
4. Имитационное моделирование с AnyLogic // XJ Technologies URL:
http://www.xjtek.ru/anylogic/why_anylogic/ (дата обращения: 09.09.2011)
5. **Никифоров В. В. Логистика.** Транспорт и склад в цепи поставок. М.: ГроссМедиа, 2008.
6. **Толуев Ю. И.** Имитационное моделирование логистических сетей. Магдебург: Университет им. Отто фон Герике, 2008.
7. Численность постоянного населения. База данных // Росстат URL:
<http://www.gks.ru/dbscripts/Cbsd/DBInet.cgi?pl=2409019> (дата обращения: 09.09.2011)

**СИТУАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ
ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ****В. М. Шпаков (Санкт-Петербург)**

Наиболее распространенным подходом к компьютерному моделированию динамических систем является математический подход. Он состоит в том, что вначале на основании законов соответствующих динамик разрабатывается математическая модель в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений относительно абстрактных переменных. Модельные эксперименты проводятся на компьютерах с использованием численных методов решения этой системы уравнений. При этом физические параметры системы входят в коэффициенты уравнений, иногда в виде достаточно сложных зависимостей. Недостаток такого подхода проявляется уже при вариациях физических параметров системы, выполняемых в ходе модельных экспериментов, и связан с необходимостью пересчета коэффициентов уравнений. Модификация же исходной модели системы или ее расширение могут потребовать существенной переработки системы уравнений и программы ее решения на компьютере.

Альтернативой этому подходу является использование физического подхода к моделированию динамических систем. В этом случае переменными модели являются физические состояния процессов в реальной системе, такие как силы, ускорения, скорости, углы, температуры, напряжения и т.п. Изменение состояний производится процедурами, реализующими соответствующие законы динамики с учетом существующих ограничений и отношений между элементами системы. Среди достоинств физических моделей необходимо отметить меньшую трудоемкость разработки модели, ее модификации и расширения, а также относительно более простые – верификацию, валидацию, визуализацию модели и интерпретацию результатов моделирования. Простота расширения модели позволяет достаточно легко моделировать процессы влияния системы на окружающую среду и влияние этой среды на систему.

Среди большого количества имеющихся на рынке компьютерных средств имитационного моделирования практически отсутствуют средства, ориентированные на разработку физических моделей. Имеющиеся компьютерные средства, обеспечивающие реализацию физического подхода к моделированию (physics engines) [1], в основном ориентированы на моделирование механических систем и предназначены для разработки компьютерных игр. Вместе с тем высокая производительность современных компьютеров обеспечивает возможность создания сравнительно простых способов реализации физических моделей динамических систем. В докладе показана возможность реализации физических моделей на основе использования ситуационно-событийного формализма спецификации транзитивной модели взаимодействующих гибридных процессов [2]. Основой формализма является абстрактная модель гибридного автомата, в которой дискретные состояния представляются логическими переменными. В множество логических переменных включается также подмножество предикатов от непрерывных состояний, которые используются для моделирования взаимодействий между процессами. Логические переменные могут определять как дискретные изменения состояний непрерывных составляющих, так и изменения динамики их развития. Состояния процессов в модели представляются множеством вещественных переменных X для непрерывных составляющих и множеством логических переменных W , содержащим подмножество Q для дискретных состояний и подмножество предикатов G , т.е. $W = Q \cup G$. Для спецификации процессов необходимо определить функции перехода следующих типов:

$\sigma: W \rightarrow Q \times \{False, True\}$ – функция трансформации дискретных состояний;

$\delta: W \times X \rightarrow X$ – функция трансформации непрерывных состояний процессов;

$\gamma: X \rightarrow G \times \{False, True\}$ – зависимость предикатов от непрерывных состояний.

Область определения функции перехода σ можно описывать с помощью логических формул, что делает описание достаточно наглядным. На наш взгляд, в качестве условия наиболее удобно использовать элементарные конъюнкции логических переменных. Такие конъюнкции интуитивно понятным образом могут интерпретироваться как логико-динамические ситуации [3]. Вводя обозначение S_j , динамическую ситуацию можно определить следующим образом:

$S_j = s_{j_1}, \dots, s_{j_i}, \dots, s_{j_n}$, где $s_{j_i} = w_{j_i}$ или $s_{j_i} = \neg w_{j_i}$, $w_{j_i} \in W$, $n = 1 \dots N_w$, $N_w = |W|$.

Обозначая множество ситуаций S , тип функции трансформации дискретных состояний теперь можно определить следующим образом: $\sigma: S \rightarrow Q \times \{False, True\}$. Эта функция может быть задана с помощью совокупности продукционных правил:

$$S_j \rightarrow r'_{j_1}, \dots, r'_{j_i}, \dots, r'_{j_m}, \text{ где } r'_{j_i} = q'_{j_i} \text{ или } r'_{j_i} = \neg q'_{j_i}, q'_{j_i} \in Q. \quad (1)$$

Функция δ должна для каждого режима определять новые значения состояния процесса, соответствующие его текущему состоянию, динамике системы, интервалу Δt , а также, возможно, текущим состояниям некоторых других взаимодействующих с ним процессов. Режим гибридного процесса естественным образом представляется с помощью динамической ситуации. Новые значения состояний процессов находятся путем вычисления их транзитивных отношений. Функция перехода δ может быть представлена с помощью совокупности правил вида:

$$S_j \rightarrow x'_k = \tau_k(x_k, x_i, \Delta t), \quad (2)$$

где $S_j \in S$ – ситуация, соответствующая режиму, τ_k – соответствующее отношение, $x_k, x_i \in X$ – состояния процессов.

Функцию γ удобно представлять совокупностью правил следующего вида:

$$((x_{j_1} \geq a_k + x_{j_2}) \wedge (x_{j_3} \leq b_k + x_{j_4})) \rightarrow g_k, \quad (3)$$

где $x_{j_1}, x_{j_2}, x_{j_3}, x_{j_4} \in X$, $g_k \in G$, a_k и b_k – константы, соответствующие некоторому диапазону. Более сложные предикаты могут формироваться из простых предикатов с помощью правил (1).

Компьютерная реализация процессов, специфицированных правилами (1–3) производится путем использования интерпретатора этих правил. Архитектура и алгоритмы функционирования интерпретатора достаточно просты. Множества переменных состояния процессов (X и W) в интерпретаторе представляются массивами записей, каждая из которых содержит имя переменной и ее значение. Все правила реализуются с помощью условных операторов «if...then...». Обе части оператора содержат записи об использованных в данном правиле переменных. Основу интерпретатора составляет исполняющая процедура, которая в цикле сканирует списки правил. Алгоритм обработки правил вычисляет значение условной части правила. Если это значение равно True, то запускается алгоритм выполнения исполнительной части правила. В случае применения правила (1) переменным из исполнительной части правила присваиваются специ-

фицированные логические значения. В случае использования правила (2) запускается указанная в исполнительной части правила процедура вычисления транзитивного отношения и найденное новое значение состояния процесса присваивается соответствующей переменной. С помощью правила (3) вычисляются значения неравенств, указанных в условной части, и их логическое произведение присваивается предикату, указанному в исполнительной части правила.

Описанный подход к реализации процессов был использован при разработке в СПИИРАН опытного образца компьютерной среды EnviCon, ориентированной на моделирование совокупностей взаимодействующих гибридных процессов [3]. Среда содержит редакторы для формирования векторов состояния процессов и списков правил трансформации описанного выше вида (1–3). Для обработки правил (2) в среде имеется набор процедур реализации арифметических операторов, функциональных зависимостей и транзитивных отношений для элементарных процессов. С помощью среды EnviCon были разработаны модели трех промышленных установок, функционирование которых определяется большим количеством взаимодействующих физических процессов.

Для иллюстрации подхода приведем спецификацию в среде EnviCon физической модели движения упругого обруча при его падении на горизонтальную плоскость. Физическими параметрами обруча являются масса (m), радиус (R) и коэффициент упругости (k). Состояниями процесса являются вертикальное ускорение (A_y), скорость (V_y), высота центра масс (h) и деформация обруча ($R-h$), возникающая при контакте обруча с плоскостью. В модели необходимо реализовать движение обруча в двух ситуациях: свободное падение при ($h > R$) и упругий удар при $\neg(h > R)$. Свободное падение обруча происходит под действием веса (P), а при контактном взаимодействии с плоскостью его движение определяется совместным действием веса и силы упругой реакции обруча (F_y). В ситуации, когда ($h > R$) скорость (V_y) определяется интегралом от ускорения свободного падения g , а высота – интегралом от скорости. Сила реакции пропорциональна деформации обруча. При этом коэффициенты пропорциональности могут быть различными при увеличении деформации и при восстановлении формы. Соответствующие ситуации определяются предикатами, которые вычисляются с помощью правил (3), а переменные состояния – с помощью правил (2). На рис. 1 представлена копия части редактора среды EnviCon, на которой приведены правила трансформации состояния обруча. Имена переменных в правилах соответствуют указанным выше. Ситуации с именами (*торможение*), (*разгон*) заданы правилами трансформации ситуаций (1) следующим образом: $(h < R), (V < 0) \rightarrow (\text{торможение})$, $(h < R), (V > 0) \rightarrow (\text{разгон})$. Представление модели в таком виде является, по нашему мнению, достаточно наглядным. Правила 2 и 3 вычисляют величину упругой реакции обруча на участках торможения и разгона, соответственно. Правило 4 вычисляет сумму сил, а правило 5 – ускорение. Правила 6 и 7 вычисляют скорость и высоту, соответственно, а правило 8 – величину деформации.

На рис. 2 приведен график изменения высоты центра масс обруча, падающего с высоты 400 см и имеющего радиус 30 см. Из графика видно, что вначале обруч приближается к плоскости на расстояние, меньшее радиуса, а в конце останавливается на расстоянии радиуса от плоскости.

№	Переменная	Процедура	Кэфф.	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация	имя параметра	значение
1	P вес	Умножение	1.00	m масса	g	EverTrue		
2	Fy реакц.	Пропорциональная	60000.00	R -- h		торможение		
3	Fy реакц.	Пропорциональная	45000.00	R -- h		разгон		
4	Fy реакц.+P	Сумма	1.00	Fy реакц.	P вес	EverTrue	2-ой коэфф.	-1.00
5	Ay ускорен.	Деление	1.00	Fy реакц.+P	m масса	EverTrue		
6	Vy скорость	Интеграл	1.00	Ay ускорен.		EverTrue		
7	h высота	Интеграл	1.00	Vy скорость		EverTrue		
8	R -- h	Сумма	1.00	R радиус	h высота	$h < R$	2-ой коэфф.	-1.00

Рис. 1. Правила трансформации состояния обруча

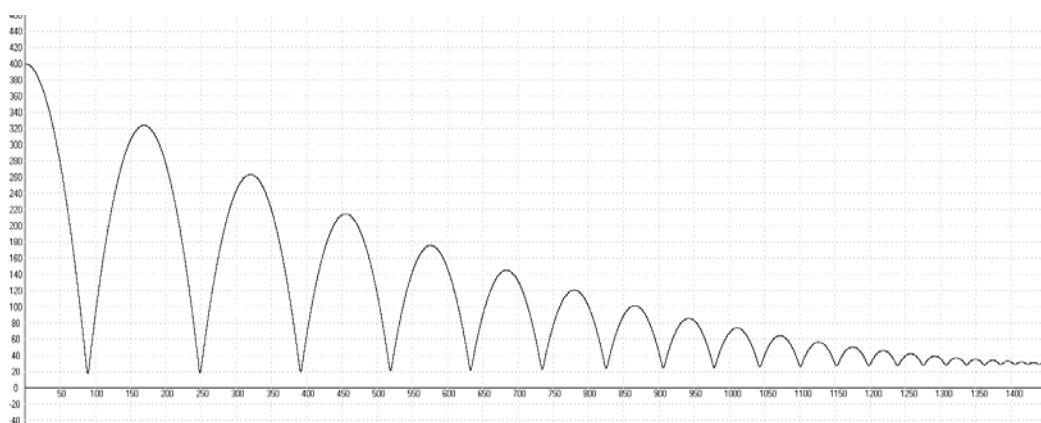


Рис. 2. График движения центра масс обруча

Рассматриваемый ситуационный подход к реализации процессов с помощью трансформационных правил позволяет модифицировать и расширять модели систем простым добавлением и заменой правил. Таким путем достигается возможность при моделировании учитывать влияние системы на окружающую среду и влияние этой среды на процессы в системе. Если, например, необходимо учесть влияние сопротивления воздуха на движение обруча, то к приведенным правилам (см. рис. 1) необходимо добавить правило, вычисляющее силу сопротивления, и сложить эту силу с весом.

Покажем, как можно расширить модель движения упругого обруча на случай его падения под некоторым углом к плоскости, т.е. когда имеется горизонтальная составляющая скорости. При наличии трения обруч в результате контакта с поверхностью начнет вращаться, а его горизонтальная скорость уменьшится. В этом случае кроме вертикальной силы реакции при контакте с поверхностью появляется горизонтальная сила, приложенная к ободу обруча и обусловленная силой трения. Воздействие этой силы на движение обруча эквивалентно действию такой же силы, приложенной к его центру масс и действию пары сил, приложенных к ободу. Их совместное действие вызывает изменение угловой скорости и горизонтальной составляющей скорости. Величина этой силы зависит от коэффициента трения и вертикальной силы, ее знак противоположен знаку скорости обода относительно поверхности.

Для моделирования надо задать момент инерции обруча и ввести переменные для представления новых состояний процесса: горизонтальной координаты (X), горизонтальных ускорения (A_x), скорости (V_x), силы трения (F_x) и момента пары сил ($M_{\text{мнг}}$). Надо также ввести скорость точки обода относительно плоскости ($V_{\text{мнг}}$), угловое ускорение, угловую скорость и угол. Сила трения возникает в ситуации, когда име-

ется контакт с поверхностью, т.е. когда расстояние центра масс от поверхности меньше радиуса обруча и когда абсолютное значение скорости обода больше нуля. Логическое значение этой ситуации определяется конъюнкцией двух предикатов. Присвоив ей идентификатор *скольжение*, правило для вычисления ее значения будет иметь вид: $(h < R) \wedge (|V_{\text{тнг}}| > 0) \rightarrow \text{скольжение}$. Эта логическая переменная должна использоваться в условной части правила для вычисления F_x . Правила для спецификации изменений этих состояний очевидным образом вытекают из законов механики. Они приведены на рис. 3.

9	УглСкор * R	Умножение	1.00	Угл. скор.	R радиус	EverTrue		
10	Vтангенц.	Сумма	1.00	Vx скорость	УглСкор * R	EverTrue	2-ой коэфф.	-1.00
11	Sign(Vтнг)	Реле	1.00	Vтангенц.		$h < R$	Верх.огран.	1.00
12	Abs(Vтнг)	Абсолютная	1.00	Vтангенц.		$h < R$		
13	Fx реакц.	Умножение	-0.15	Sign(Vтнг)	Fy реакц+P	Скольжение		
14	Ax ускорен.	Деление	1.00	Fx реакц.	m масса	EverTrue		
15	Vx скорость	Интеграл	1.00	Ax ускорен.		EverTrue		
16	X	Интеграл	1.00	Vx скорость		EverTrue		
17	M тнг	Умножение	-1.00	Fx реакц.	R радиус	$h < R$		
18	Угл. ускор	Деление	1.00	M тнг	Мом. Инерц.	$h < R$		
19	Угл. скор.	Интеграл	1.00	Угл. ускор		$h < R$		
20	Угол	Интеграл	1.00	Угл. скор.		EverTrue		

Рис. 3. Правила для моделирования вращения обруча

Добавление этих 12 правил к имеющимся 8 правилам позволяет моделировать падение обруча при наличии горизонтальной составляющей скорости и вращении обруча. На рис. 4. приведены графики изменения высоты, горизонтальной и угловой скоростей, полученные при моделировании процесса падения обруча с высоты 400 см и наличии начальной горизонтальной скорости 300 см/с.



Рис. 4. Изменения во времени высоты, горизонтальной и угловой скоростей

Из графиков видно, что в ситуации, когда имеется контакт обруча с поверхностью ($h < R$), происходит возникновение и нарастание угловой скорости и уменьшение горизонтальной скорости.

Приведенное рассмотрение позволяет сделать вывод о том, что физические модели динамических систем могут быть эффективно реализованы на основе использования ситуационно-событийного формализма спецификации гибридных процессов. Приведенный пример реализации физической модели иллюстрирует удобство разработки физической модели и простоту ее расширения.

Литература

1. **Adrian Boeing, Thomas Bräunl**. Evaluation of real-time physics simulation systems // <http://www.adrianboeing.com/pal/papers/p281-boeing.pdf>.
2. **Шпаков В. М.** Ситуационные спецификации имитационных моделей гибридных реактивных систем // Труды СПИИРАН. Т. 2. Вып. 1. СПб.: СПИИРАН, 2002. С. 212–222 .
3. **Шпаков В. М.** Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // Сб. докл. конференции “Имитационное моделирование. Теория и практика”, Санкт-Петербург, 19–21 октября 2005. Т. II. С. 292–295.

СЛУЧАЙНЫЕ ГРАФЫ С НЕЛИНЕЙНЫМ ПРАВИЛОМ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО СВЯЗЫВАНИЯ В СИСТЕМЕ АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMBIGRAPH

Е. Б. Юдин, В. Н. Задорожный, Е. А. Пендер (Омск)

Введение

В соответствии с выводами европейского сообщества по развитию агентных вычислений AgentLink III [1] приоритетным направлением развития теории агентного моделирования является разработка сетевых структур взаимодействия между агентами. В системе агентного имитационного моделирования (СИМ) SIMBIGRAPH [2] такие структуры реализуются и поддерживаются разнообразными графовыми моделями среды взаимодействия агентов. В работах [3, 4] SIMBIGRAPH используется в качестве базового инструмента анализа сложных процессов в сетях и решетках (рис. 1).

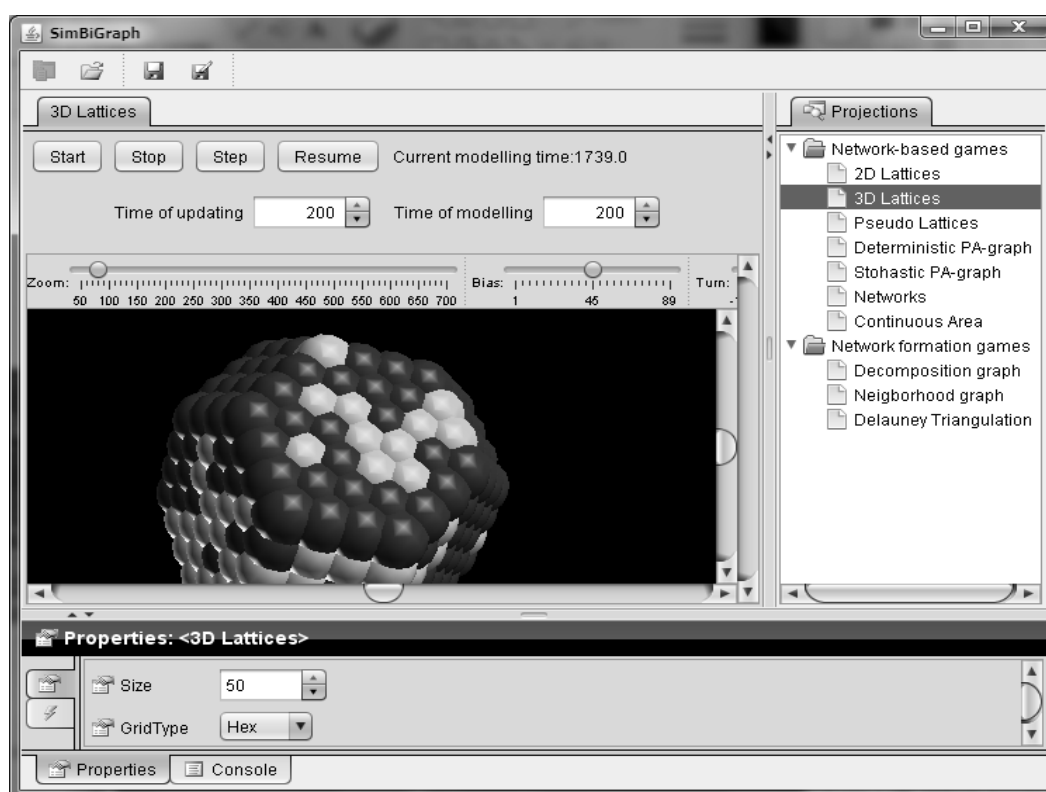


Рис. 1. Моделирование в SIMBIGRAPH процесса сегрегации атомов на поверхности биметаллической наночастицы

СИМ SIMBIGRAPH является программой с открытым кодом, зарегистрированной на сайте <http://sourceforge.net>.

Сетевые структуры в SIMBIGRAPH

Для моделирования сетевых структур SIMBIGRAPH предоставляет:

- ✓ широкий набор средств моделирования решеток (реализованы взаимодействия агентов в гексагональной, квадратной, треугольной, кубической решетках, а также в решетке, образуемой гранецентрированной кубической упаковкой шаров);

- ✓ широкий набор генераторов случайных графов, в том числе генераторы случайных графов с нелинейным правилом предпочтительного связывания (сл.г. с НППС [5]), графов Барабаши-Альберт (графов БА [6]), графов Эрдеша-Реньи, Эпштейна, конфигурационных версий безмасштабных графов и т.д.;
- ✓ средства калибровки генерируемых графовых моделей по имеющимся статистическим данным о моделируемых реальных сетях;
- ✓ импорт/экспорт файлов с использованием широко распространенных форматов представления графов;
- ✓ широкий набор методов для анализа статистических характеристик графов;
- ✓ широкие возможности визуализации графов (рис. 2).

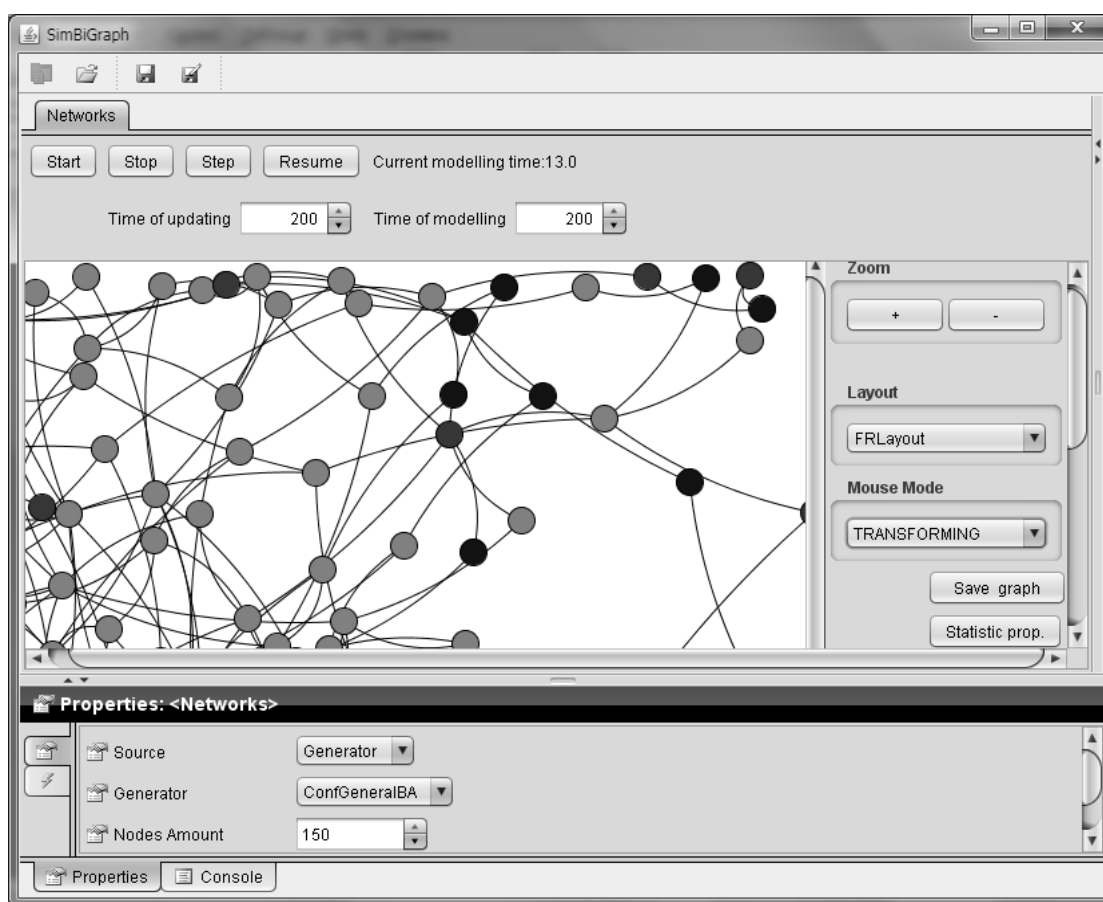


Рис. 2. Моделирование графов в SIMBIGRAPH. На панели Properties: <Networks> задаются параметры генератора графа. В окне отображения модели в интерактивном режиме можно изменять масштаб, выбирать алгоритм отображения графа и т.д.

После построения графа имитационное моделирование в SIMBIGRAPH заключается в программировании агентов (параллельно функционирующих активных сущностей) на языке JAVA, запуске имитации, автоматическом сборе данных и их анализе.

Граф БА и случайные графы с НППС

Рассмотрим генератор графа БА (реализован во многих СИМ, например, в AnyLogic) и генератора сл.г. с НППС (реализован впервые в SIMBIGRAPH).

Граф БА «выращивается» из небольшого графа-затравки путем многошагового процесса добавления новых вершин с фиксированным числом ребер $m \geq 1$. Свободный конец каждого нового ребра присоединяется к имеющейся i -й вершине графа, которая выбирается случайно с вероятностью p_i , пропорциональной локальной степени связности k_i этой вершины:

$$p_i = k_i / \sum_j k_j. \quad (1)$$

Распределение степени связности вершин (РСС) при генерации графа БА асимптотически (при $k \rightarrow \infty$) пропорционально $k^{-\alpha}$: $Q_k \propto k^{-\alpha}$, где Q_k – вероятность того, что случайно выбранная вершина имеет степень связности k . Распространенность степенного РСС (рис. 3; масштаб логарифмический) привело к широкому использованию графов БА при моделировании таких сетей, как Интернет, социальные сети и т.д.

На каждом шаге генерации сл.г. с НППС к графу добавляется новая вершина со случайным числом x ($g \leq x \leq h$) ребер (случайное приращение графа). Вероятность p_i связывания нового ребра с i -й вершиной графа пропорциональна функции предпочтения f от k_i :

$$p_i = f(k_i) / \sum_j f(k_j). \quad (2)$$

Функцию $f(k) = f_k$ можно задать рядом $f = f_g, f_{g+1}, \dots, f_k, \dots$, в котором $f_g > 0$ и $f_k \geq 0$ при $k > g$. Из (1)–(2) видно, что граф БА является частным случаем сл.г. с НППС.

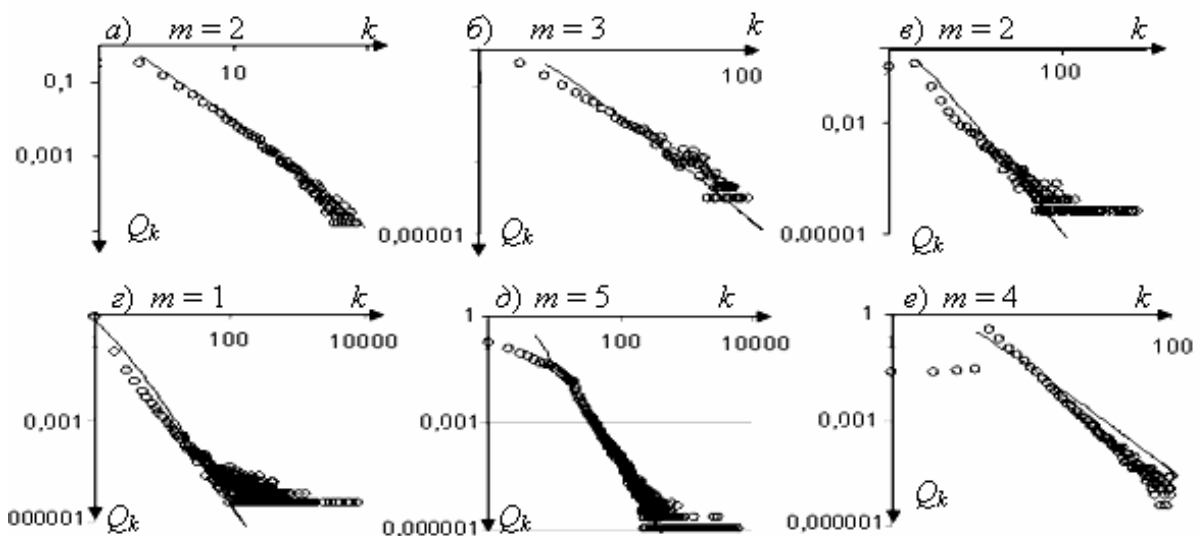


Рис. 3. РСС в реальных сетях (маркеры) и в моделирующих их графах БА (линия):
 а – сеть маршрутизаторов; б – сеть пользователей программы PGP; в – сеть автономных систем Интернет; г – сеть адресов электронной почты; д – сеть ссылок веб-страниц; е – сеть товаров Интернет-магазина Amazon

В SIMBIGRAPH калибровка сл.г. с НППС (подбор параметров генератора) автоматизирована и позволяет выращивать графы с заранее заданным РСС. На рис. 4–5 представлены РСС в реальных сетях и в калиброванных сл.г. с НППС.

Для калибровки параметров генераторов сл.г. с НППС формируется класс на языке JAVA, реализующий функцию предпочтения и случайное приращение ребер методами из [5]. Пользователь SIMBIGRAPH имеет возможность вручную редактировать код (рис. 6), устанавливать число шагов генерации, указывать граф-затравку. Сформированный код компилируется, и запускается процесс генерации графа.

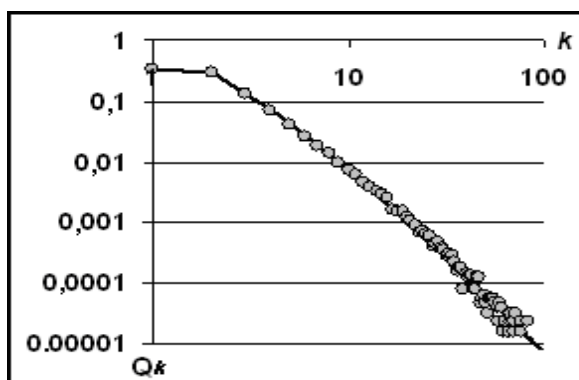


Рис. 4. РСС калиброванного графа и сети маршрутизаторов Интернет

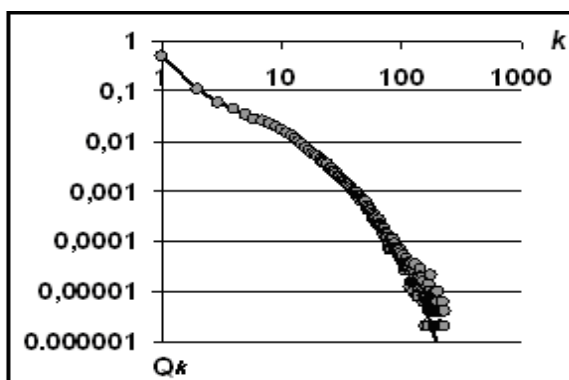


Рис. 5. РСС калиброванного графа и сети участия актеров в общих фильмах

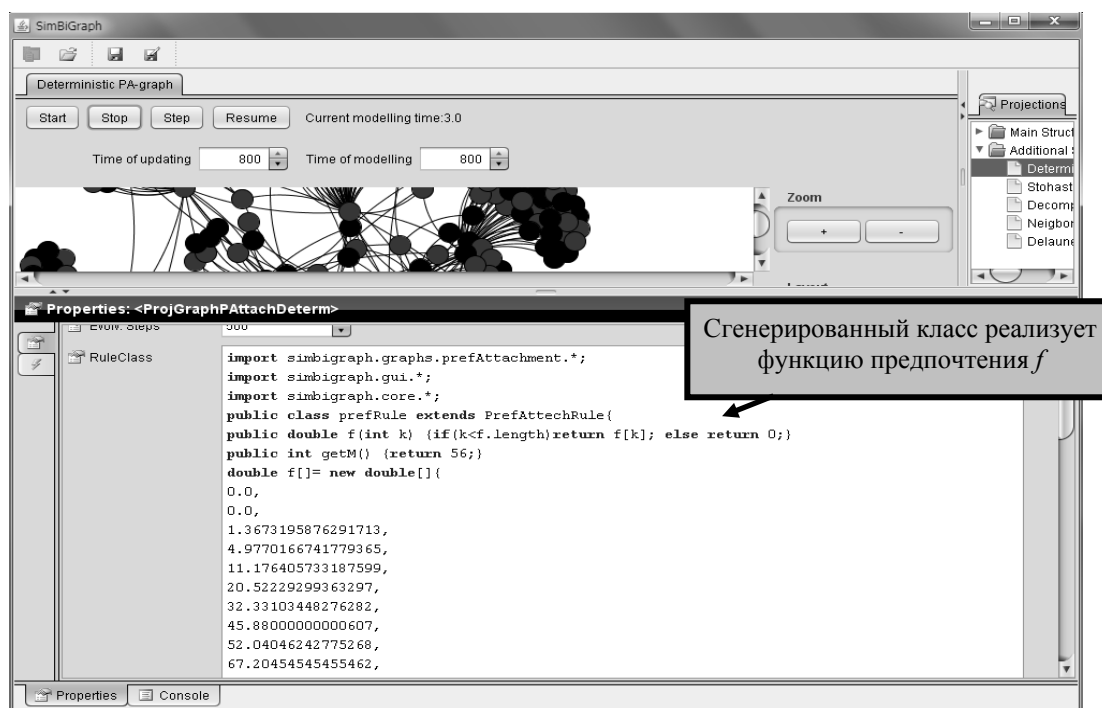


Рис. 6. Калибровка параметров генерации сл.г. с НППС в SIMBIGRAPH

Пример применения: исследование устойчивости сети Интернет

Графовые модели эффективно используются для исследования устойчивости сетей. Так, Р. Пастор-Саторас и А. Виспиани продемонстрировали, что пороговая сопротивляемость графов БА к распространению вирусов сходится к нулю с ростом числа вершин, что объясняет необычную «живучесть» вирусов в биологических и компьютерных сетях. Другое интересное свойство графов БА, установленное Ш. Хавлином, заключается в том, что такие графы очень устойчивы к случайным удалениям вершин/ребер (так моделируются случайные отказы), но чувствительны к целенаправленным «атакам» на концентраторы (когда удаляются узлы с высокой связностью).

Рассмотрим устойчивость при случайных отказах сети Интернет на основе ее моделирования графами БА и сл.г. с НППС (рассматриваются модели, которые входят

в число демонстрационных примеров SIMBIGRAPH). Моделирование случайных отказов заключается в проведении на сл.г. с НППС и графах БА серии экспериментов, в каждом из которых с заданной вероятностью удаляются вершины/ребра и размер максимального контактного кластера сравнивается с размером максимального кластера при моделировании на сети маршрутизаторов[6]. Как видно из рис. 7, при моделировании устойчивости к случайным удалениям узлов/ребер на сл.г. с НППС получены более точные результаты, чем на графе БА, что свидетельствует о большей адекватности сл.г. с НППС.

Это подтверждается и при моделировании распространения вируса. Рассмотрим, например, модель «восприимчивый – инфицированный – восприимчивый». Узлы сети могут находиться в двух состояниях: «восприимчивый» и «инфицированный». На каждом шаге моделирования инфицированный узел может инфицировать смежный ему восприимчивый с вероятностью ν , и в то же время сам узел может перейти в состояние «восприимчивый» с вероятностью δ . Коэффициент распространения λ определим как $\lambda = \nu/\delta$. На рис. 8 представлена зависимость плотности инфицированных вершин ρ от λ , полученная при имитационном моделировании в SIMBIGRAPH.

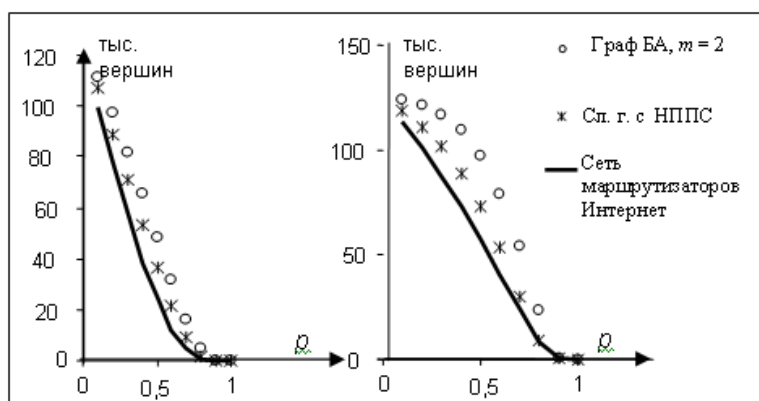


Рис. 7. Зависимость размера максимального кластера от вероятности случайного удаления узлов (слева) или связей (справа) в сети маршрутизаторов Интернет, в графах в БА и сл.г. с НППС (124651 узлов)

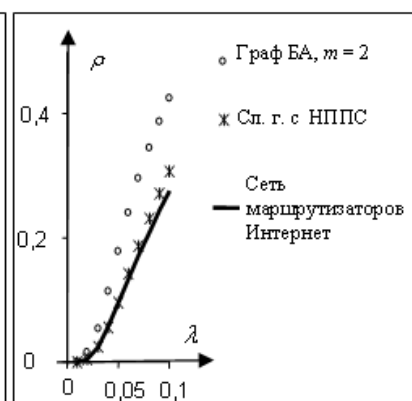


Рис. 8. Зависимость плотности инфицированных вершин ρ от коэффициента распространения λ

Заключение

Система агентного моделирования SIMBIGRAPH обладает широкими возможностями генерации графовых моделей и проведения на них имитационных экспериментов. В частности, в SIMBIGRAPH впервые реализованы средства калибровки генераторов случайных графов с НППС на основе статистических данных о реальных сетях.

Сравнение результатов моделирования сети маршрутизаторов Интернет двумя видами графов позволяет сделать вывод о существенных преимуществах графов с НППС [5], реализованных в SIMBIGRAPH. Использование сл.г. с НППС, методов их генерации и калибровки позволяет принципиально повысить адекватность графовых моделей и радикально улучшить точность и обоснованность результатов решения множества актуальных задач, связанных с контролем, управлением и оптимизацией процессов в таких сетях, как Интернет, сети социальных контактов, сети товаров, биологические сети и многие другие.

Литература

1. Roadmap of AgentLink III, the European Coordination Action for Agent-Based Computing (IST-FP6-002006CA) edited by Michael Luck et al., AgentLink III, 2005. 108 p.
2. Система агентного моделирования SIMBIGRAPH / В. Н. Задорожный, Е. Б. Юдин // Свидетельство о регистрации электронного ресурса №16539 / Объединённый фонд электронных ресурсов «Наука и Образование», 2011. № 50201050316.
3. **Коробов В. В.** Создание среды для последующего моделирования вирусного маркетинга // Прикладная математика и фундаментальная информатика: Сб. науч. трудов. Омск, 2011. С. 103–105.
4. **Ганеева М. И., Огнев Д. А., Пендер Е. А.** Построение агентных моделей в системе моделирования SIMBIGRAPH // Информационные технологии и автоматизация управления, матер. регион. конф. Омск, 2011. С. 103–105.
5. **Задорожный В. Н.** Случайные графы с нелинейным правилом предпочтительного связывания // Проблемы управления. 2010. № 6. С. 2–11.
6. **Barabasi A., Albert R.** Emergence of scaling in random networks // Science. 1999. Vol. 288. P. 60-69.
7. Сеть маршрутизаторов Интернет, 2006 г., URL: <http://www.cise.ufl.edu/research/sparse/mat/Pajek/internet.mat> (дата обращения: 01.09.2009).

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
(НА ПРИМЕРЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ РОСОБРНАДЗОРА)*****А. А. Постников, А. Ю. Крупский (Москва), В. В. Девятков (Казань)**

Одной из основных задач, решаемых Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки (далее по тексту Служба), является переход к оказанию государственных и муниципальных услуг, предоставляемых органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации и органами местного самоуправления в электронном виде.

В настоящей статье рассматривается методика, позволяющая исследовать процесс обслуживания заявок на оказание электронных услуг, входящих в компетенцию Службы. Ядром методики является имитационное приложение - статистическая модель процесса обслуживания заявок, разработанная с помощью системы моделирования GPSS. В методике предусмотрена оценка влияния на эффективность процесса обслуживания характеристик аппаратно-программной инфраструктуры информационных систем и алгоритма действий персонала Службы, участвующего в реализации государственных услуг. К этим факторам относятся производительность и память персональных компьютеров, серверов, коммуникационного оборудования, оргтехники, а также практически все элементы действий персонала, приводящие к задержке в обработке заявок на услуги.

Замечательной особенностью разработанной методики является возможность судить о характере процесса обслуживания непосредственно в ходе моделирования. Процесс моделирования может быть прерван по требованию исследователя, если, например, очереди растут и система в устоявшийся режим не входит. Эта возможность имеет решающее значение, когда возникает необходимость провести многовариантное исследование, а каждый вариант в статистическом моделировании может занять большое время даже для сравнительных мощных компьютеров, на которых проводится исследование. Кроме этого, в методику встроена система планирования эксперимента, обеспечивающая возможность определения влияния значений входных параметров на значения показателей эффективности функционирования информационной системы.

Моделирующий алгоритм модели, являющийся основой методики, отражает технологический процесс обслуживания заявок на оказание государственных услуг в электронном виде. Речь идет о двух (пока) услугах:

Предоставление информации о документах об образовании и результатах проверки подлинности бланков документов об образовании (*Услуга 47*). Расчеты показывают, что количество запросов, поступающих в Службу в рамках Услуги 47, составит порядка 70-80 тысяч запросов в день в период с мая по сентябрь каждого года. Формирование и ведение базы данных об участниках единого государственного экзамена, а также о зачислении в высшие и средние специальные учебные заведения лиц, успешно прошедших вступительные испытания (*Услуга 48*.) Для оказания Услуги 48 создается специального информационный ресурс, к которому подключены все учреждения СПО и ВПО (около 7000). Если принять количество абитуриентов в год 1 млн, и каждый имеет возможность подать документы в 5 ОУ, то получаем 5 млн. уникальных заявлений. Длительность приемной компании – 2 месяца.

Анализ особенностей Услуг 47 и 48 показывает, что и та и другая услуга представляют собой запросы на получение данных. Процесс оказания услуг относится к категории человеко-машинных процессов и это учтено при разработке моделирующего

* По техническим причинам статья помещена после докладов секции 2.

имитационной модели информационных систем Службы. В моделирующем алгоритме учтено, что возможности человека (скорость ввода информации, скорость чтения и т.п.) ограничены, а также тот момент, что в алгоритме реализации услуги предусмотрено некое согласование (визирование, подпись) данных, требующее ожидания.

На рис. 1 приведен алгоритм обслуживания заявок, который был взят за основу при составлении программы имитационной модели

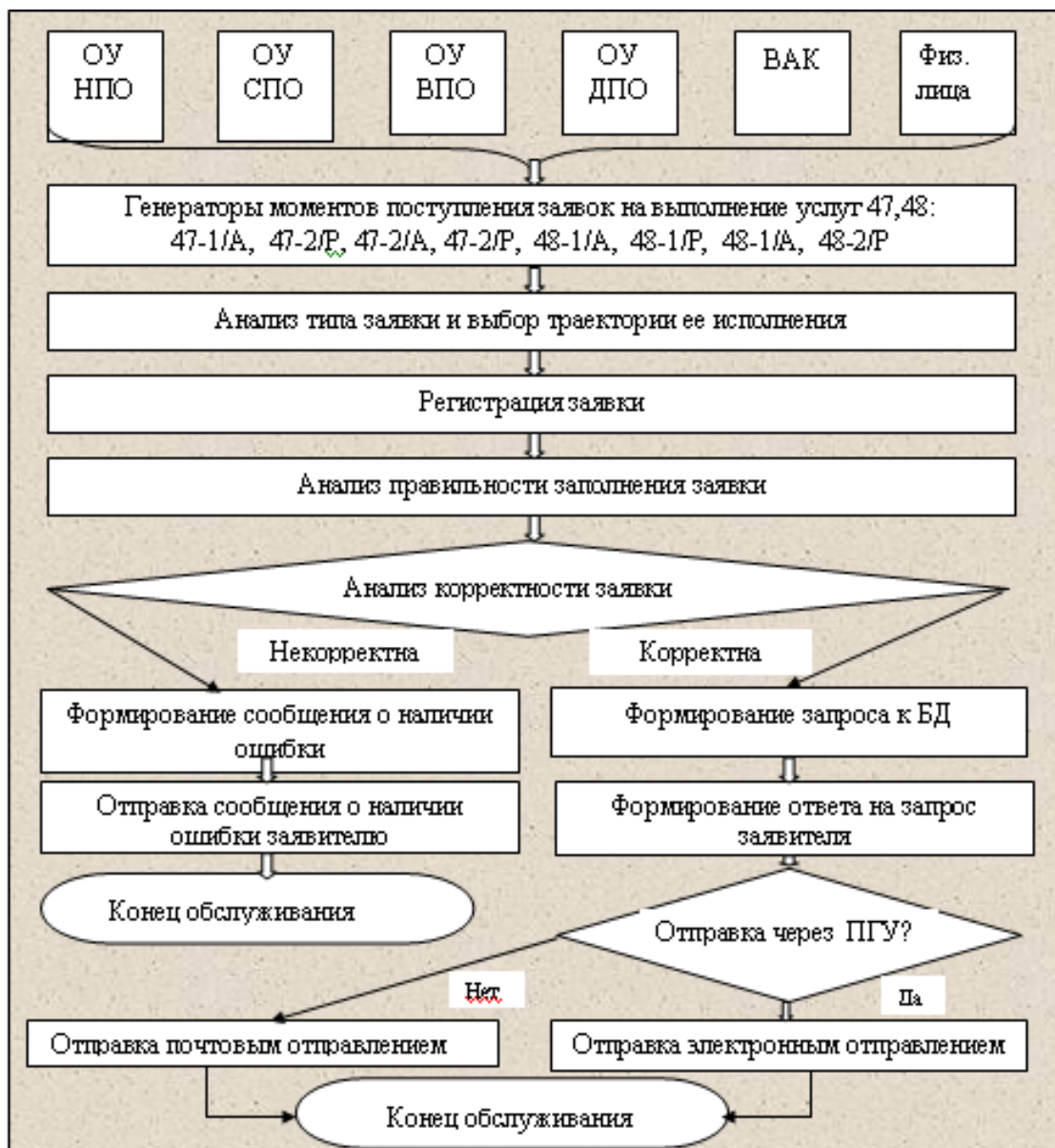


Рис. 1. Алгоритм процесса обслуживания заявок на оказания услуг 47 и 48

Методика доведена до 100%-й программной реализации как в части реализации моделирующего алгоритма на языке моделирования GPSS, так и в части надстройки - удобного и понятного во всех отношениях пользовательского интерфейса. По ссылке [<http://www.megaupload.com/?d=QSVHTKGV>] можно посмотреть ролики, иллюстрирующие работу методики.

Ввод исходных данных для моделирования, осуществляется с помощью формы, представленной на фото 1.

Описание ресурсов

Количество почтовых серверов: 2
Среднее время обслуживания и модификатор (сек): 2, 0.5

Количество серверов ФРДО: 1
Среднее время обслуживания и модификатор (сек): 1, 0.5

Количество операторов: 100
Среднее время визирования и модификатор (сек): 80, 20
Среднее время визирования и модификатор (сек): 90, 30

Устанавливает недоступность операторов ночью: 1
1 - недоступны ночью 0 - доступны ночью

Входной поток заявок

Интенсивность потока заявок: 0.125 (ед. в сек.)
Вероятность некорректных заявок: 0.1 (в долях)

тип 47_1А: 0.125 (ед. в сек.), 0.1 (в долях)
тип 47_1Р: 0.125 (ед. в сек.), 0.1 (в долях)
тип 47_2А: 0.125 (ед. в сек.), 0.1 (в долях)
тип 47_2Р: 0.125 (ед. в сек.), 0.1 (в долях)
тип 48_1А: 0.125 (ед. в сек.), 0.1 (в долях)
тип 48_1Р: 0.125 (ед. в сек.), 0.1 (в долях)
тип 48_2А: 0.125 (ед. в сек.), 0.1 (в долях)
тип 48_2Р: 0.125 (ед. в сек.), 0.1 (в долях)

Фото 1. Форма для контроля ввода исходных данных

Формы для мониторинга процесса моделирования представлены на фото 2, 3

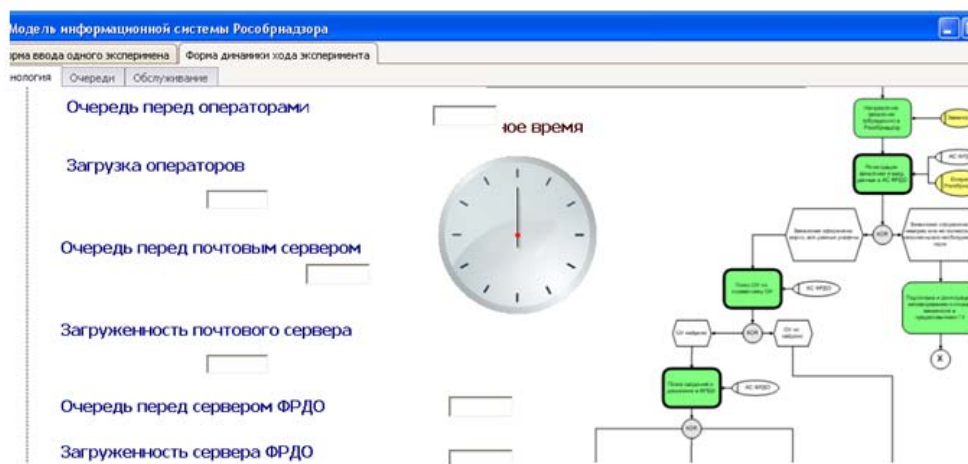


Фото 2. Вкладка «Технология» для мониторинга процесса моделирования

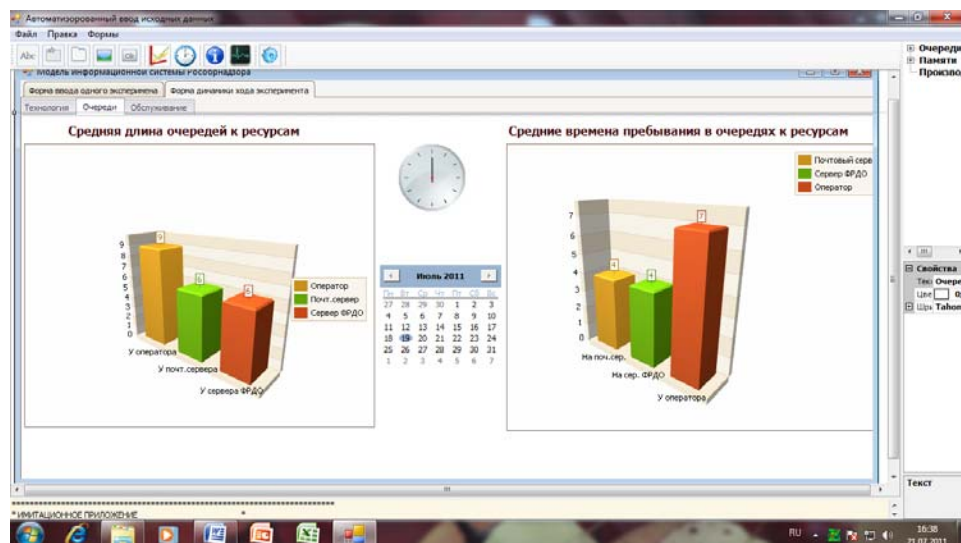


Фото 3. Вкладка «Очереди» для мониторинга процесса моделирования

Пример результата моделирования выдаются в виде форм, приведенных на фото 4.

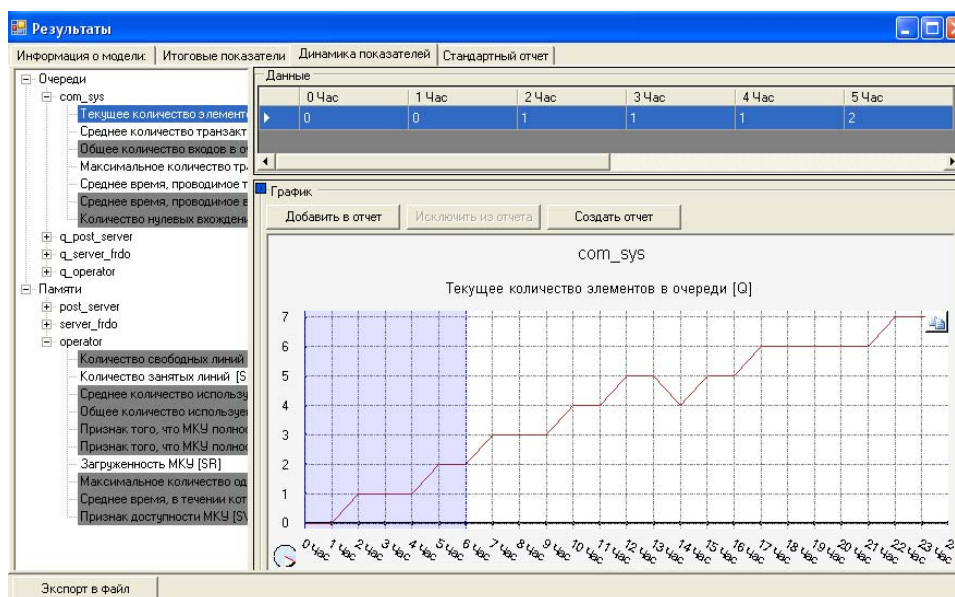


Фото 5. Динамика изменения системных показателей

В заключение отметим, что разработанная методика может быть использована как для оценки эффективности процесса обслуживания заявок на услуги, входящие в компетенцию Рособрандзора, так и для оценки информационных систем, алгоритм которых также предусматривает человеко-машинный процесс обработки заявок. В каждом конкретном случае особенности процесса обслуживания можно учесть путем вариации исходными данными, а также путем модификации модели. В последнем случае масштабы перепрограммирования будут незначительны.

Литература

1. **Постников А. А.** Постановка задачи на разработку имитационного приложения информационной системы. Наукoведение. Интернет-журнал. Вып. № 2 (7) 2011. <http://naukovedenie.ru>
2. **Крупский А. Ю. Постников А. А.** Формализация процессов обработки заявок в информационных системах. Наукoведение. Интернет-журнал. Вып. № 2 (7) 2011. <http://naukovedenie.ru>
3. **Постников А. А.** Реализация имитационного приложения для оценки эффективности информационных систем. Наукoведение. Интернет-журнал. Вып. № 2 (7) 2011. <http://naukovedenie.ru>

РЕФЕРАТЫ

Аксенов К. А., Смолий Е. Ф. Мультиагентное имитационное моделирование бизнес-процессов и организационно-технических систем, среда BPsim. С. 11.

В работе рассматривается интеграция системы имитационного моделирования и интеллектуальных систем поддержки принятия решений с целью повышения эффективности проектирования организационно-технических систем и управления бизнес-процессами.

Вишнякова Л. В., Дегтярев О. В., Слатин А. В. Имитационное операционное моделирование процессов функционирования сложных авиационных систем и комплексов управления. С. 30.

В докладе описывается опыт имитационного математического моделирования авиационных операций применительно к двум задачам: оценки эффективности боевых операций с применением авиационных систем и средств и оценки эффективности использования воздушного пространства отечественной системы организации воздушного движения самолетов ГА. Представляемые автоматизированные комплексы имитационного моделирования в течение ряда лет используются для проведения исследований по заданию заказчиков. В первом случае исследования проводятся для обоснования новых решений по облику авиационной техники и поиска оптимальной тактики организации боевых операций. Во втором случае эти исследования касаются оценки эффективности предлагаемых и принимаемых при проведении модернизации решений по структуре системы организации воздушного движения.

Власов С. А., Девятков В. В., Кобелев Н. Б. Имитационные исследования: от классических технологий до облачных вычислений. С. 42.

В данной работе рассматриваются вопросы стремительного повышения вычислительной сложности имитационных исследований в САИИ. Приводятся примеры количественной оценки сложности вычислений на отдельных этапах исследования. Предлагаются концепция реализации современной САИИ в виде архитектуры облачного моделирования.

Плотников А. М., Рыжиков Ю. И., Соколов Б. В. Современное состояние и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации. С. 51.

Проведен обзор 1-й, 2-й, 3-й, 4-й и 5-й Всероссийской конференции по имитационному моделированию с точки зрения используемых методов, языков и систем моделирования, практических применений. Отмечены элементы новизны и недостатки докладов.

Руховец Л. А. Математические модели для решения задач сохранения водных ресурсов больших стратифицированных озер и их применение. С. 62.

Для решения задач сохранения водных ресурсов больших стратифицированных озер создан комплекс математических моделей, в который входят модель гидротермодинамики и модели экосистемы, реализованные на данных и материалах Ладожского и Онежского озер, крупнейших в Европе. Все модели являются трехмерными, так как в больших озерах физические условия в различных точках водного тела сильно отличаются. В моделях наряду с методами математического моделирования используются и методы имитационного моделирования. С помощью созданных моделей исследован процесс антропогенного эвтрофирования Ладожского и Онежского озер.

Сотников К. А., Ивановский Р. И., Беляев А. Н., Карпов Ю. Г. Роль имитационного моделирования в задачах внедрения технологий Smart Grid. С. 65.

В докладе рассматривается использование имитационного моделирования при выполнении двух крупных проектов по разработке приложений Smart Grid – электроэнергетических сетей нового поколения. Внедрение инновационных технологий в электроэнергетику отличается от подобных процессов в других сферах огромным возможным выигрышем в эффективности, но и огромными возможными материальными потерями при внедрении неверных решений, например, в управлении ЭЭС. На таком объекте невозможно ставить натурные эксперименты по проверке тех или иных решений: развал электроэнергетической системы при таких экспериментах приведет к коллапсу целых районов страны. Единственным выходом в решении проблем инновационного обновления управления энергосистемой является имитационное моделирование.

Толуев Ю. И., Иванов Д. А. Инженерные традиции в имитационном моделировании производственных и логистических систем. С. 75.

В работе сравнивается практика применения двух парадигм моделирования: дискретно-событийного моделирования и моделирования методом системной динамики. Опыт создания и применения рекомендаций VDI в Германии описывается как пример формирования устойчивых инженерных традиций в области имитационного моделирования, которые строго соблюдаются при разработке моделей производственных и логистических систем. В качестве второй традиции описывается всемирно распространённая практика работы с главным хранилищем публикаций по имитационному моделированию – трудами Зимней конференции WSC.

Алексеев А. В., Орлов К. М. Полимодельная оценка качества и оптимизация сложных эрготехнических систем. С. 89.

Рассматриваются факторы, особенности и пути решения проблем возрастания сложности современных эрготехнических систем (ЭТС) на основе методологии и технологии полимодельной многокритериальной оценки их качества (при одновременном использовании нескольких моделей) с оптимизацией выбора наилучшего из возможных вариантов построения, создания и эксплуатации ЭТС. Приведены результаты вариантной полимодельной оптимизации с использованием технологии КРОПУР и АСОП широкого спектра ЭТС, включая системы электронного документооборота, различные классы средств защиты информации, а также системы типа CAD, ERP, PLM. Опыт проведения модельных исследований показал особую важность и конструктивность использования системных аспектов и данных имитационного моделирования при полимодельном анализе-синтезе ЭТС, методологии и технологии проведения анализа их качества, динамики эмерджентных свойств, а также актуальность и целесообразность квалитетического мониторинга управления качеством ЭТС, квалитетического анализа факторов и проблем обоснования программ внедрения новых технологий с учётом «человеческих» факторов.

Алиев Т. И., Асафьев Г. К. Проблема сочетания генераторов псевдослучайных величин в GPSS-моделях. С. 95.

Излагаются результаты исследования влияния генераторов псевдослучайных величин на погрешность моделирования высоконагруженных систем массового обслуживания. Показано, что некоторые так называемые проблемные сочетания генераторов приводят к большой погрешности определения среднего времени ожидания заявок в системе, достигающей десятков процентов. Приводятся результаты анализа проблемных сочетаний.

Барщевский Г. Е., Горячев А. А. Синтез плана имитационного эксперимента для определения вероятностных характеристик показателей качества судовых автоматизированных систем. С. 101.

Рассматривается синтез планов имитационного эксперимента для определения вероятностных характеристик показателей качества судовых автоматизированных систем с учетом разброса отдельных параметров. Предлагаются планы, моменты которых равны моментам распределения этих параметров.

Березовская Ю. В., Воробьев В. А. Каузальное моделирование – метод имитационного моделирования сложных систем. С. 105.

Описана имитационная модель поведения сложных систем – популяция автоматов. Для моделирования динамики популяции применяется Каузальная Сеть. Позициям сети соответствуют состояния автоматов. Маркировка сети задаёт число автоматов, находящихся в соответствующих состояниях. Переходы отображают события, возникающие в результате совместных действий элементов популяции. На переходах сети заданы их интенсивности. Для реализации каузальной модели разработана компьютерная программа «Популяция».

Боев В. Д. Некоторые аспекты адекватности систем имитационного моделирования дискретно-событийных процессов. С. 109.

Приводятся сравнительные оценки результатов моделирования разнородных дискретных процессов, полученных на моделях одной и той же системы в GPSS World и AnyLogic. Делаются выводы об адекватности систем относительно результатов моделирования дискретно-событийных процессов.

Верзилин Д. Н., Потапычев С. Н., Рыжков Н. А. Применение имитационного моделирования для оценки реакции социально-экономических систем на внешние воздействия. С. 115.

Имитационное моделирование представлено как средство преодоления фрагментарности статистических данных, используемых для оценки реакции социально-экономических систем на внешние воздействия. Аппарат знаковых графов применен для описания зависимостей между внешними и внутренними факторами динамики системы и для управления имитационными экспериментами.

Верхушин Д. И. Методика имитационного моделирования и испытаний на помехоустойчивость устройств формирования и приема сигналов в цифровой связи. С. 120.

Предлагается методика, которая в отличие от известных обеспечивает выполнение требований по статистической репрезентативности результатов экспериментальных исследований характеристик помехоустойчивости на основе алгоритма адаптивного наращивания размера выборки до достижения заданных в технических требованиях значений доверительной вероятности и доверительного интервала.

Горохов А. В., Халиуллина Д. Н. Имитационное моделирование развития научно-инновационного предприятия. С. 124.

Предложена информационная технология поддержки стратегического планирования развития малого научно-инновационного предприятия. Технология основана на имитационном моделировании фаз развития предприятия и обеспечивает выделение критических точек, требующих принятия управленческих решений.

Гурьянов В. И. Логический подход в методологии имитационного моделирования активных систем. С. 129.

Рассматриваются объектные имитационные модели организационных систем. Обсуждается метод *model checking* как составная часть методологии имитационного эксперимента. Предложены формулы темпоральной логики CTL* для моделей иерархических игр.

Диденко Д. Г. Качество генерации псевдослучайных чисел в системах имитационного моделирования OpenGPSS, GPSS/World и AnyLogic. С. 134.

В докладе рассмотрены аспекты генерирования псевдослучайных чисел в системах моделирования GPSS/PC, GPSS/World и OpenGPSS. Сравниваются их качественные и количественные результаты работы с помощью батареи тестов Diehard и критерия Пирсона. После реализации линейного конгруэнтного метода удаётся повысить качество работы системы моделирования OpenGPSS.

Долгушин Д. Ю., Задорожный В. Н., Кокорин С. В. Двухуровневое моделирование автотранспортных потоков на основе клеточных автоматов и систем с очередями. С. 139.

Приводится описание разработанной комплексной модели дорожного движения на основе стохастического многополосного транспортного клеточного автомата. Предлагается концепция двухуровневого моделирования с использованием клеточных автоматов и сетей массового обслуживания.

Емельянов А.А., Власова Е. А., Емельянова Н.З. Имитационное моделирование инвестиционных процессов. С. 145.

Обсуждается метод анализа инвестиционного процесса с системных позиций. Анализируется динамика взаимного влияния инвестора, с одной стороны, и объекта инвестирования, с другой стороны. Для принятия решений предлагается комплексная модель, состоящая из двух частей: имитационной и аналитической. Методы и модели объединяются в составе виртуального моделирующего стенда. В качестве примера рассматривается инвестиционный процесс, связанный с муниципальным землепользованием.

Ермаков С. А., Замятина Е. Б. Оптимизация распределенных алгоритмов имитационного моделирования. С. 151.

В статье рассмотрены разработки в области распределенных алгоритмов синхронизации, предложен подход, позволяющий повысить их эффективность. Результаты применения предложенного подхода сравниваются с применением традиционных подходов.

Задорожный В. Н., Кутузов О. И. Моделирование и расчет буферов фрактальных СМО. С. 156.

Обсуждаются специфические проблемы моделирования узлов компьютерных сетей, обусловленные фрактальной природой их трафика. Предлагается метод расчета буферов фрактальных СМО.

Киндинова В. В., Кузнецова Е. В. О методе построения имитационной модели на примере задачи исследования конкуренции двух фирм. С. 162.

Разработана имитационная модель с использованием системно-динамического подхода. Построение имитационной модели осуществлялось путем поэтапного усложнения исходной базовой модели. За базовую модель была принята модель Басса. Имитационная модель позволяет исследовать рынок дуополии. Экспериментально обнаружено и исследовано явление гистерезиса и лавины.

Кириллов Н. П. Концептуальная модель процессов управления функциональными состояниями технических систем и возможности ее прикладного использования. С. 168.

Рассматривается оригинальный метод построения концептуальной модели указанных в названии процессов, которая может быть использована для решения ряда прикладных задач, связанных с имитационным моделированием технических систем.

Кобелев Н. Б. Управляющие имитационные модели больших систем. С. 172.

Работа посвящена новому направлению – имитационному управлению большими объектами (системами). Предложены элементы теории и построена имитационная управляющая модель многоуровневой системы с многокритериальным разделением функций. Показано на примере, как можно использовать имитационное управление на реальных объектах.

Ковтун Л. И., Шарков Н. А. Интеллектуальный интерпретатор критических событий и их последствий в корабельной АСУ на базе упреждающего имитационного моделирования и ситуационного анализа контролируемых процессов. С. 181.

Современное кораблестроение отличается иерархической интеграцией сложно структурированных комплексов машиностроения и обслуживающего персонала (экипажа), функционирующих в условиях нестабильной природной среды, внешних и внутренних возмущающих воздействий. Сложность управления такими объектами постоянно возрастает, появляются быстродействующие сетевые системы сбора, обработки и координации информационных потоков. Несмотря на это, задача принятия наиболее ответственных управленческих решений остается за человеком-руководителем. В зарубежной и отечественной практике активно проводятся исследования по созданию интеллектуальных человеко-машинных рабочих мест руководства, способных представлять прогнозные оценки рисков по результатам мониторинга и имитационного моделирования контролируемых процессов. Создание подобных систем должно основываться на упреждающем имитационном моделировании, нечеткой логике, алгебре суждений и нейроподобных сетях.

Конюх В. Л. Валидация имитационной модели процесса транспортирования. С. 189.

Валидация сводится к сравнению выходов системы и ее модели при одинаковом входном воздействии. Для процесса транспортирования предлагается добиваться равенства грузопотоков на входе и выходе имитационной модели. Доказательством соответствия разработанной модели процессу транспортирования является также сравнение результатов моделирования времени от начала работы источников грузопотока до появления груза на выходе транспортной сети с расчетным. Предложенные методы проверены при имитационном моделировании процесса доставки горной массы подземной транспортной сетью с 6 источниками грузопотоков, 12 конвейерами и 5 промежуточными бункерами.

Малыханов А. А., Черненко В. Е. Метод идентификации параметров агентных моделей автотранспорта с использованием информации GPS-навигаторов. С. 203.

Средства измерения характеристик автомобильного потока, необходимые для калибровки низкоуровневых имитационных моделей, часто оказываются недоступными или дорогостоящими. Для идентификации параметров агентов в условиях отсутствия специализированного оборудования предлагается метод, использующий информацию GPS-навигаторов, установленных на автомобилях участников движения. Разработан программный продукт, позволяющий собирать GPS-треки, анализировать их и формировать файл с информацией для параметризации агентных имитационных моделей дорожного движения в среде AnyLogic.

Муравьева-Витковская Л. А. Оценка характеристик приоритетной модели звена передачи данных мультисервисной компьютерной сети. С. 207.

Предлагается приближенный метод расчета характеристик приоритетной модели звена передачи данных мультисервисной компьютерной сети. На основании результатов имитационного моделирования выполнена оценка погрешностей характеристик и определены области параметров нагрузки, при которых приближенный метод, разработанный в предположении о пуассоновском характере трафика, позволяет получить приемлемые для инженерной практики результаты.

Осипов А. Б. Система массового обслуживания с несколькими классами заявок и потерями на переключении канала. С. 214.

В статье рассматриваются вопросы моделирования и расчета систем массового обслуживания с несколькими классами заявок и потерями на переключении канала. Дано описание системы, отмечены ее характерные особенности. Представлена имитационная модель системы на GPSS. Приводится формула для расчета коэффициента загрузки системы. Выполняется проверка расчетных значений с помощью имитационного эксперимента. Даны рекомендации, полезные при проектировании подобных систем.

Осипов В. Ю. Моделирование морских транспортных систем на основе интеллектуальных геоинформационных систем. С. 219.

Рассматривается подход к моделированию морских транспортных систем на основе интеллектуальных геоинформационных систем (ГИС). В качестве интеллектуального ядра таких ГИС предлагается использовать специальную ассоциативную машину, включающую в себя нейронную сеть с управляемыми пространственными сдвигами совокупностей единичных образов вдоль слоев. В отличие от известных подходов предлагаемый метод позволяет существенно расширить возможности по интеллектуальной обработке динамической разнородной пространственно соотнесенной информации, как в интересах анализа текущих, так и прогнозирования будущих событий, связанных с морскими транспортными системами.

Павлов А. Н. Агрегативно-декомпозиционный подход к моделированию управляемой реконфигурации катастрофоустойчивой информационной системы (КАИС). С. 223.

Проведен анализ проблем, связанных с решением задачи управления реконфигурацией КАИС. Предлагаются основные этапы агрегативно-декомпозиционного подхода к моделированию управляемой реконфигурации структурных состояний КАИС.

Паньковский И. Ю., Бобин А. В., Слатин А. В. Технология построения имитационной математической модели воспроизведения хода боевых действий. С. 229.

В докладе представлена технология построения имитационной математической модели, позволяющей на современных компьютерах воспроизводить ход боевых действий с участием авиации, зенитно-ракетных комплексов, средств связи, средств добывания, обработки и доведения информации. Дано целевое назначение предлагаемой технологии. Приведены структура построения модели и использованные принципы имитационного моделирования. Основные возможности технологии показаны на примере использования модели при решении ряда практических задач.

Перцев Н. В., Леоненко В. Н. Имитационное моделирование распространения ВИЧ-инфекции на основе стохастических рекуррентных уравнений. С. 234.

Работа посвящена построению и изучению стохастической имитационной модели, описывающей распространение ВИЧ-инфекции в неоднородной популяции. Построена имитационная модель распространения ВИЧ на основе системы стохастических рекуррентных уравнений. Описан алгоритм моделирования, приведены аналитические оценки на математические ожидания численностей групп населения. Представлены результаты вычислительных экспериментов для двух наборов параметров: случай сохранения инфекции в популяции и случай затухания инфекции.

Песиков Э. Б. Аналитический инструментарий оценки и управления рисками виртуального предприятия на основе статистического моделирования. С. 239.

Рассматривается один из возможных подходов к построению аналитического инструментария оценки и управления рисками виртуального предприятия, основанного на применении методов риск-менеджмента, статистического моделирования и аналитической имитационной системы "AnyLogic". Приводятся математическое описание функционирования территориально распределенной производственной системы с сетевой организацией с учетом случайного характера риск-факторов, а также математические модели управления рисками виртуального предприятия. Обсуждаются вопросы применения оптимизационных моделей для управления рисками и выбора наилучшего метода управления рисками.

Разумов Д. А., Алёшин В. Д. Имитационное моделирование в жизненном цикле автоматизированных систем управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях. С. 244.

Техногенные катастрофы последних лет, практика их преодоления помимо методов и средств по предотвращению кризисных ситуаций выдвигают требования к проектированию и созданию современных региональных автоматизированных систем управления. В работе предлагаются модели жизненного цикла (ЖЦ) системы правообладателя и поставщика. Основываясь на моделях ЖЦ, предлагается формализация задач, для которых целесообразно использовать ИМ. Для поддержки стадии технорабочего проекта предлагается имитационная модель, обсуждаются подходы и проблемы определения параметров моделей.

Рыжиков Ю. И. Техника моделирования многоканальных приоритетных систем. С. 250.

Показана целесообразность прямой имитации многоканальных систем обслуживания на языках типа Фортран. Описана технология имитации подобных систем, намечены ее обобщения. С помощью имитационной модели тестируется методика расчета среднего времени ожидания заявок разных типов в многоканальных системах обслуживания с абсолютным и относительным приоритетами, основанная на инвариантах отношений.

Савина А. Л. Математические аспекты построения агентной модели миграционных потоков. С. 255.

Рассматриваются математические аспекты построения агентной модели миграционных потоков. Определены основные принципы получения нечетких оценок уровня жизни, и описана общая модель принятия решения агентом, которая учитывает качественные и количественные характеристики области принятия решений.

Савина О. А., Савина А. Л. Алгоритмические аспекты построения агентной модели миграционных потоков. С. 260.

Рассматривается агентная модель миграционных потоков, основанная на структуризации поведения агента и определении влияния его внутреннего представления об окружающем мире на его деятельность. Приведена общая событийная схема модели миграционных потоков, и дано описание алгоритмической реализации событийных секций.

Селиверстов С. А. Инвариантный статистический анализ работы систем управления транспортными процессами. С. 265.

Концептуально инвариантный статистический анализ работы системы управления транспортными процессами связан с отказом от генеральной совокупности случайных событий с априори заданным на ней законом распределения и опирается на исчисление статистических инвариантов, не зависящих от длины выборки случайных событий. Указанный инвариантный статистический анализ включает аналитическое определение параметров внешних и внутренних граничных условий и внутренней структуры распределения наблюдаемого потока случайных событий. Дается качественная оценка его эффективности.

Соколов Б. В., Иконникова А. В., Потрясаев С. А., Рагиня Э. А. Комбинированные алгоритмы оценивания устойчивости планов применения сложной технической системы. С. 269.

Рассматриваются методологические и методические основы организации и проведения комплексного моделирования сложных технических систем (СТС) при оценивании устойчивости их планов применения (программ управления). Предлагается комбинированные методы оценивания устойчивости указанных программ.

Соснин В. В. Дисциплины обслуживания с прерываниями, реализуемые стандартными средствами GPSS. С. 275.

Рассматриваются дисциплины обслуживания с прерываниями, реализуемые стандартными средствами GPSS, т.е. блоками SEIZE и PREEMPT. Анализируются особенности функционирования этих дисциплин. Приводятся рекомендации по рациональному конструированию дисциплин обслуживания с прерываниями в GPSS.

Степанцов М. Е. Моделирование некоторых сценариев развития систем железных дорог России и Украины. С. 282.

В работе изложена динамическая модель развития транспортной сети, разработанная автором. Ее основной особенностью является то, что развитие транспортной сети не является процессом централизованного решения задачи оптимизации перевозок, а рассматривается как результат самоорганизации на основе потребностей в перевозках товаров и развития инфраструктуры узлов сети. На основе этой модели созданы имитационные системы, моделирующие сети железных дорог России и Украины, с помощью которых исследованы некоторые сценарии развития этих транспортных систем.

Фридман А. Я., Фридман О. В. Имитационный подход к моделированию координации сложных динамических систем. С. 286.

Имитационная модель сложной динамической системы, в которой могут возникать структурные и параметрические возмущения, исследована с целью оценки эффективности инкрементных методов ее координации. На примере линейных объектов управления показана возможность расширения диапазонов устойчивости локальных управлений при наличии координации.

Чадеев В. М., Аристова Н. И. Модели для имитационного моделирования реальной экономики. С. 291.

Рассматривается модель реальной экономики, основанная на формальном описании технологической операции. Каждый тип технологической операции описывается четырьмя параметрами: временем выполнения операции человеком и роботом, вероятностью правильного выполнения операции человеком и роботом. Предлагается алгоритм, позволяющий определить оптимальное распределение работ между роботами и людьми, по критерию минимальных затрат времени человека, включая затраты на изготовление роботов. Описанная в докладе модель позволяет находить оптимальное распределение как аналитически (для простых случаев), так и с помощью имитационного моделирования.

Чертовской В. Д. Имитация процесса планирования работы технологической линии производства. С. 295.

Рассматриваются вопросы имитации процесса планирования технологической линии. Исследуются варианты взаимодействия структурных элементов по горизонтали.

Чукин Д. Ю., Трегуб И. В. Имитация динамики цен биржевых инструментов с использованием модели случайного блуждания цен с устойчивыми шагами. С. 301.

Данная работа посвящена имитации цен биржевых инструментов с использованием модели случайного блуждания. В работе использованы устойчивые распределения с бесконечной дисперсией изменения цен. Подобный шаг позволил существенно повысить прогнозное качество имитационной модели.

Шоров А. В., Котенко И. В. Теоретико-множественное представление имитационных моделей инфраструктурных атак и механизмов защиты от них. С. 306.

Защита компьютерных сетей от инфраструктурных атак является одной из наиболее актуальных проблем компьютерной безопасности. Для разработки эффективных механизмов защиты от инфраструктурных атак необходимо исследовать механизмы выполнения инфраструктурных атак, варианты развития атак, воздействие атак на целевую компьютерную сеть, а также механизмы защиты от них. В данной статье представлены теоретико-множественные модели, используемые для создания имитационных моделей

механизмов реализации атак и защиты от них, в том числе механизма защиты, основанного на биоинспирированном подходе «нервная система сети».

Юдин Е. Б., Васильев Е. Р. Генерация графов соседства в среде распределенного агентного моделирования RepastHPC. С. 311.

Предлагается генератор графа соседства, реализованный в системе моделирования для высокопроизводительных вычислительных кластеров RepastHPC. Граф соседства рассматривается как обобщение базовых моделей теории перколяции (решеток), что позволяет исследовать критические явления в пространственно-распределенных сетях.

* * *

Александров В. В. Единая облачная имитационная среда GPSS Cloud. С. 315.

Рассматриваются концепция и особенности построения облачных систем автоматизации имитационных исследований (САИИ). Облачный подход существенно упрощает и унифицирует проведение имитационных исследований для конечных пользователей, а также позволяет строить распределенные и высокопроизводительные модели. Приводятся структура и возможности облачной моделирующей системы GPSS Cloud, образующей единую имитационную SaaS-среду для всех типов моделирования, инвариантную к окончательному оборудованию и программному обеспечению.

Александров В. В., Александрова В. В., Зайцева А. А. Технология когнитивного имитационного программирования. С. 320.

Описываются современные подходы к трехмерному твердотельному моделированию с учетом использования технологий быстрого прототипирования. Предложена концептуальная схема унифицированной системы когнитивного программирования, и описаны возможности ее применения в современных системах имитационного моделирования.

Александров В. В., Сикачев В. Ю. Комплекс имитационного моделирования управляемого воздушного движения в аэродромном пространстве. С. 326.

Представлено описание комплекса моделирования движения воздушных судов в аэродромном пространстве, предназначенного для проведения исследований по оценке структуры воздушного пространства аэропорта и анализу его пропускной способности, а также поддержки разрабатываемых процедур и средств управления очередями прибывающих и вылетающих из аэропорта воздушных судов.

Антоненко В. А., Волканов Д. Ю., Чистилин М. В. Средство генерации кода имитационной модели, совместимой со стандартом HLA. С. 331.

Описывается средство генерации кода имитационных моделей по диаграммам состояний UML, позволяющее использовать полученные модели в среде моделирования с поддержкой High Level Architecture (HLA).

Бабкин Е. А., Разиньков В. В. Среда имитационного событийного моделирования. С. 336.

Рассматривается организация, языки визуального моделирования и программирования моделей среды имитационного событийного моделирования ESImPL, ориентированной на обучение имитационному моделированию. Среда разработана на основе представления поведения дискретной системы в виде событийного графа.

Березнев Е. В., Григорьев Р. Н., Самойлов Д. В., Слатин А. В., Масленников А. А. Программное средство трехмерной визуализации результатов имитационного моделирования. С. 341.

Рассматривается разработанное авторами кроссплатформенное программное средство визуализации, позволяющее в трехмерном пространстве отображать результаты моделирования функционирования различных объектов на фоне трехмерной модели местности. Отображение производится в соответствии с информацией, сформированной различными математическими моделями и записанной в специальном формате, как при пост-полетном анализе, так и в режиме реального времени.

Гарбарев А. Ю. Реализация системы агентного имитационного моделирования в WEB. С. 346.

Изложен подход к построению веб-ориентированной системы моделирования. Производится обзор архитектуры разработанной системы. Предложены направления развития системы.

Девятков В. В., Исаев Ф. В. Универсальный редактор форм для моделей на GPSS World. С. 350.

Описывается новая система автоматизации имитационных исследований – универсальный редактор форм для моделей на GPSS World. Приводятся основные функции редактора, принципы его работы и примеры практического применения. Показаны преимущества, которые дает редактор – автоматизация ряда этапов имитационного исследования; возможность преобразования готовой модели на GPSS World в удобный полнофункциональный инструмент для проведения исследования.

Девятков В. В., Федотов М. В. Расширенный редактор GPSS World. С. 355.

Представлен расширенный редактор имитационных моделей для языка GPSS World. Описываются возможности программы по управлению моделями, их редактированию, обработке, выполнению и отладке; а также подход к конструированию моделей в виде схем на основе типовых элементов, определяемых пользователем.

Жуков М. В., Золотухин В. В. Имитационное моделирование процесса функционирования системы спутниковой связи с целью анализа и оптимизации показателей надежности. С. 360.

В данной работе рассматриваются вопросы анализа и оптимизации структурной надежности современных систем спутниковой связи с использованием имитационного моделирования в среде AnyLogic. Предлагается математическая и разработанная на её основе дискретно-событийная имитационная модель функционирования системы спутниковой связи в виде диаграммы состояний (state chart).

Закиров В. И., Золотухин В. В. Исследование надежности беспроводных сетей связи методом имитационного моделирования в среде AnyLogic. С. 365.

В данной работе предлагается разработанная авторами имитационная модель функционирования беспроводной сети связи в условиях воздействия внутренних и внешних дестабилизирующих факторов с целью оценки качества функционирования и оптимального выбора средств структурного резервирования и защиты от различных видов атак.

Кринецкий Е. О., Шебеко Ю. А. Агентная парадигма компьютерной имитации в задачах моделирования поведения Grid-инфраструктур. С. 370.

Разработан прототип имитационной модели поведения Grid-инфраструктуры с использованием агентной парадигмы. Построение имитационной модели производилось поэтапно, разрабатывая различные типы агентов для моделирования базовых элементов Grid-инфраструктур, а также алгоритмов их взаимодействия. В работе рассматривается группа алгоритмов, где механизм распределения ресурсов основан на разделении пространства ресурсов между заданиями, в результате чего каждое задание получает необходимый объем ресурсов на требуемое время в эксклюзивном режиме. Разработанный прототип оснащен интерактивным интерфейсом, позволяющим переконфигурировать Grid-инфраструктуру, очередь обрабатываемых заданий, и проводить оценку работы механизма распределения ресурсов.

Мишин Д. В. О применении среды моделирования AnyLogic в исследовании эффективности алгоритмов выбора администраторов корпоративной сети передачи данных. С. 373.

Предлагаются модель администратора и алгоритмы выбора администраторов корпоративной сети передачи данных. Формализуется задача повышения эффективности восстановительных работ в корпоративной сети. Рассматривается имитационная модель автоматизированной системы администрирования.

Морозов В. П. Средства автоматизации моделирования потоковых систем в среде MS Excel. С. 378.

Рассматривается система моделирования, реализованная в среде MS Excel. Система основана на методологии моделирования на базе алгоритмических сетей и ориентирована на предметные знания конечного пользователя.

Рыбаков В. Н., Кузьмичев В. С. Разработка виртуальной лаборатории испытаний ГТД. С. 388.

Описана концепция построения виртуальной лаборатории испытаний ГТД. Виртуальная лаборатория испытаний ГТД является составной частью его виртуальной модели и позволяет имитировать испытания по определению основных эксплуатационных характеристик.

Рябинин К. В. Модуль трёхмерной визуализации для СИМ Triad.Net. С. 393.

Рассмотрена реализация модуля трёхмерной визуализации результатов прогона модели для системы имитационного моделирования Triad.Net. Описаны основные архитектурные и технические особенности разработанного модуля.

Филь Ю. Ю., Михайлов В. В. Система предварительной обработки метеоданных. С. 398.

Среди абиотических факторов, оказывающих влияние на экосистемы, важнейшими являются метеофакторы. Данные по ним получают различными способами. Наиболее предпочтительными по составу данных и точности являются непосредственные замеры на метеостанциях. Однако такие данные необходимо подготовить к дальнейшему использованию в компьютерных моделях, ГИС и т.д. В работе рассмотрена система предварительной подготовки метеоданных для проведения биоклиматических расчетов.

Хубаев Г. Н., Щербаков С. М. Автоматизированная генерация имитационных моделей на основе UML-диаграмм в системе СИМ-UML. С. 404.

Рассматривается инструментарий автоматизированного синтеза имитационных моделей деловых процессов. Приводится методика построения моделей на основе UML-диаграмм. Описываются функциональные возможности и особенности системы СИМ-UML.

Чемерицкий Е. В., Волканов Д. Ю., Смелянский Р. Л. Оценка применимости среды CERTI для моделирования PBC PB. С. 409.

В настоящей работе рассматривается возможность использования системы моделирования CERTI, реализующей стандарт High Level Architecture (HLA), для исследования свойств распределённых вычислительных систем реального времени (PBC PB). Работа содержит результаты сравнения производительности данной системы с аналогичными результатами специализированной системы моделирования – стенда ПНМ. Авторами проводится критический анализ архитектуры CERTI, предлагается несколько путей её развития и адаптации к решению задач PBC PB.

Черненко В. Е., Малыханов А. А. Библиотека для имитационного моделирования логистических сетей. С. 414.

В консультационных проектах по оптимизации транспортной логистики возникает потребность в разработке имитационных моделей. Инструментарий для имитационного моделирования логистических сетей не сложился, и поэтому используются инструменты общего назначения. Было предложено совместить графическое изображение карты, информацию об объектах на карте и транспортной сети на платформе AnyLogic. На основе предложенного подхода была реализована библиотека для среды AnyLogic. Показан пример модели управления транспортным парком, реализованной с помощью разработанной библиотеки.

Шпаков В. М. Ситуационный подход к реализации физических имитационных моделей динамических систем. С. 419.

Обсуждаются достоинства физических имитационных моделей динамических систем. Предлагается подход к реализации таких моделей, основанный на использовании ситуационно-событийного формализма спецификации транзитивных моделей гибридных процессов. Кратко изложен этот формализм и показаны пути его использования для реализации физических имитационных моделей. Возможности применения рассматриваемого подхода иллюстрируются примерами реализации физических моделей простых динамических систем.

Юдин Е. Б., Задорожный В. Н., Пендер Е. А. Случайные графы с нелинейным правилом предпочтительного связывания в системе агентного моделирования SIMBIGRAPH. С. 425.

Рассмотрена система агентного моделирования SIMBIGRAPH с позиций предоставляемых возможностей моделирования сетей. Описан реализованный в SIMBIGRAPH генератор случайных графов с нелинейным правилом предпочтительного связывания. Приводится пример имитационного моделирования характеристик устойчивости сети Интернет.

ABSTRACT

Aksyonov K. A., Smoliy E. F. The multi agent simulation of business processes and socio organization systems, BPsim tool. P. 11.

Paper focuses on integration of simulation modeling system and decision support system in order to achieve efficient processes design in organizational-technical systems and business processes control.

Vishnyakova L. V., Degtyarev O. V., Slatin A. V. Simulating operational modeling of processes of functioning of difficult aviation systems and management complexes. P. 30.

The experience of aircraft operations mathematical simulation is considered for two problems: the effectiveness estimation for combat aircraft and system operations and the effectiveness estimation of airspace usage for Russian Federation ATM System. Presented computer-aided systems and software tools have been used for several years in investigations for different customer orders. In the first case investigations is provided substantiation of new aircraft performance specification and search of combat operation tactic decision. In the second case these investigations is concerned effectiveness estimation of suggested variants of ATM system and airspace structure.

Vlasov S. A., Deviatkov V. V., Kobelev N. B. Simulation research: from classical technologies to cloud computations. P. 42.

The paper discusses questions of computational complexity growth of simulation research in Computer-Aided Simulation Research Systems (CASR). Quantitative estimate of computational complexity of various research stages is given. The paper proposes the implementation concept of modern CASR based on Cloud Simulation Architecture.

Plotnikov A. M., Ryzhikov Yu. I., Sokolov B. V. The current status and development trends of simulation in the Russian Federation. P. 51.

The review of the 1st, 2nd, 3, 4 and 5 Russian Conference on the Imitation Modeling is presented. The points of view are used methods, language and systems of modeling, application areas. The new elements and deficiencies of reports are noticed.

Rukhovets L. A. Mathematical models for solving problems of water conservation of large stratified lakes and their application. P. 62.

For solving the problems of water conservation of large stratified lakes complex mathematical models were created, which includes the hydrodynamics model and ecosystem models, based on the data and materials of the Ladoga and Onega lakes, the largest in Europe. All models are three-dimensional, as in large lakes physical conditions at different points in the water body are very diverse. In the models, methods of mathematical modeling and simulation were used. With the help of the created models the processes of anthropogenic eutrophication of lakes Ladoga and Onega was investigated.

Sotnikov K. A., Ivanovsky R. I., Belyaev A. N., Karpov Yu .G. The Role of Simulation Modeling in Smart Grid Realization. P. 65.

The report considers deployment of simulation modeling in fulfillment of two large-size projects of Smart Grid applications development. Implementation of innovative technologies to electric power industry differs from suchlike processes in other spheres by potentially huge advantage in effectiveness, and huge possible financial losses caused by application of incorrect solutions, for example, in the area of power grids control. Such an object is characterized by impossibility of full-scale experiments for revision of any given solutions: breakdown of power system when fulfilling such experiments will cause power collapses in the whole regions. The unique solution for solving the problems of power systems' control innovative renovation is the wide utilization of simulation modeling.

Tolujew J., Ivanov D. Sustainable engineering approaches to simulation of production and logistics systems. P. 75.

In this paper, we compare two basic simulation paradigms, i.e., the discrete-event simulation and systems dynamics. We describe the expediencies of VDI design and application in Germany as an example of building sustainable engineering simulation traditions as a basis for the elaboration of simulation models for production and logistics systems. As another example, we consider the world-wide recognized tradition of using the WSC proceedings as the largest database of simulation research papers.

Alekseev A. V., Orlov K. M. Полимодельная оценка качества и оптимизация сложных эрготехнических систем. P. 89.

Discusses the factors and features of solutions to the problems of increasing complexity of modern systems er-gotekhnicheskikh (ETS) based on the methodology and technology polimodelnoy multicriteria assessment of their quality (when using multiple models) with the optimization of selecting the best possible options for building, creating and ETS operation. The results of variant-term polimodelnoy optimization technology KROPUR and Hazor Shih rokogo ETS spectrum, including electronic document management systems, different classes of information security and systems such as CAD, ERP, PLM. Experience in modeling studies showed the particular importance and the constructive use of system and data aspects of simulation modeling of polimodelnom in the analysis-synthesis ETS methodology and technology for the analysis of their quality, dynamics, emergent properties, as well as the relevance and the feasibility of kvalimetricheskogo monitoring quality control FCS, quality-metry-cal analysis of the factors and issues justify the introduction of new software tech-nologies, taking into account the "human" factors.

Aliev T. I., Astaf'ev G. K. The problem of combining random number generators in GPSS models. P. 95.

Research is devoted to the question of how the choice of a GPSS random number generator (RNG) influences the results of a queueing system simulation. Authors claim that if definite RNGs are used in combination, the inaccuracy of the simulation results may reach tens per cent. The results of the analysis of such RNGs are reported.

Berezovska Y. V., Vorob'ev V. A. The causal modelling is the method of the simulation modelling of the complex systems. P. 105.

The population of automata is a simulation model of the behavior of complex systems. Modeling of population dynamics is implemented by Causal Net. Net places represent the states of automata. A net marking specifies a number of automata that are in corresponding states. Transitions represent events that result from the joint actions of the elements of a population. For each transition of net some value is specified, it defines probability (rate) of the transition response. The program "Population" has been developed for the causal model implementation.

Boev V. D. Some aspects of adequacy of systems of imitating modeling it is discrete-sobytijnyh processes. P. 109.

Comparative estimations of results of modeling of the diverse discrete processes received on models of the same system in GPSS World and AnyLogic are resulted. Conclusions about adequacy of systems concerning results of modeling of discretely-sobytijnyh processes become.

Verzilin D. N., Potapychev S. N., Ryzhkov N. A. Simulation tasks in estimating reactions of socio-economic systems to external actions. P. 115.

Simulation was presented as a tool for overcoming fragmentary of statistical data to be used for estimating reactions of socio-economic systems to external actions. Apparatus of signed graphs was applied for description of interdependencies between external and internal factors of system's dynamic and for control of simulation experiments.

Verkhushin D. I. Technique of imitating modeling and tests for a noise stability of modems of digital communication. P. 120.

The technique which unlike known provides performance of requirements on a statistical representativeness of results of experimental researches of characteristics of a noise stability is offered. It is based on a basis of algorithm of adaptive escalating of the size of sample before achievement of the values of confidential probability set in technical requirements and a confidential interval.

Gorokhov A. V., Khaliullina D. N. Simulation modelling of scientific innovative enterprise development. P. 124.

The informational technology of support of strategic planning of small scientific innovative enterprise development is proposed. The technology is based on simulation modelling of enterprise development phases and assures assigning critical points requiring management decision-making.

Gurianov V. I. The logical approach in the methodology of simulation modeling of active systems. P. 129.

The article considers object simulation models of organizational systems. The method of model checking as a part of methodology of simulation experiment is discussed. The formulas of temporal logics CTL* are offered for models of hierarchical games.

Didenko D. G. Quality of generation of pseudorandom number in simulation system OpenGPSS, GPSS/World and AnyLogic. P. 134.

The report deals with questions of generation of pseudorandom number in simulation systems OpenGPSS, GPSS/World and AnyLogic. Their quality and quantitative job results are compared by Diehard tests battery and Pearson's chi-square test. After the implementation linear congruential generator to increase quality of work simulation system OpenGPSS.

Dolgushin D. Y., Zadorozhnyi V. N., Kokorin S. V. Vehicular traffic modeling by means of parallel computations. P. 139.

The paper describes the developed complex model of automobile traffic flow based on stochastic multilane cellular automaton. The concept of road network optimization by means of two-tier modeling involving cellular automaton and queuing models is proposed.

Emelyanov A. A., Vlasova E. A., Emelyanova N. Z. Simulation of investment processes. P. 145.

The method of the investment process analysis from system positions is discussed. We analyze the dynamics of mutual influence of investors, on the one hand, and the object of investment, on the other side. For decision-making provides for an integrated model consisting of two parts: simulation submodel and analytical submodel. Methods and models are combined in the virtual modeling stand. As an example, consider an investment process that is associated with the municipal land using.

Ermakov S. A., Zamyatina E. B. Optimizing distributed simulation synchronization protocols. P. 151.

We discuss and analyze synchronization protocols for Parallel Discrete Event Simulation and propose an approach to increase its performance. Performance of our approach implementation is compared to traditional protocols.

Zadorozhnyi V. N., O Kutuzov. I. Simulation of buffers of fractal queuing systems. P. 156.

Specific problem of modeling nodes of computer networks, caused by the fractal nature of their traffic, are discussed. The method of calculating fractal buffer of queuing systems is proposed.

Kindinova V. V., Kuznetsova E. V. About the method of construction of imitating model on an example of the research problem of a competition of two firms. P. 162.

The imitating model is developed with use of the system dynamic approach. Construction of imitating model was carried out by stage-by-stage complication of initial base model. Bass's model has been accepted for the base model. The imitating model allows to research the market duopoly. The phenomenon of a hysteresis and an avalanche is experimentally revealed and is investigated.

Kirillov N. P. Conceptual model of managerial processes by functional conditions of technical systems and possibilities of its applied use. P. 168.

In article the original method of construction of conceptual model of the processes specified in the name which can be used for the decision of some the applied problems connected with imitating modelling of technical systems is considered.

Kobelev N. B. Operating imitating models of greater systems. P. 172.

Work is devoted to a new direction – to imitating management of greater objects (systems). Elements of the theory are offered and the imitating operating model of multilevel system with multicriterion division of functions is constructed. It is shown on an example as it is possible to use imitating management on real objects.

Kovtun L. I., Sharkov N. A. Critical events and there consequences intelligent interpretator in ships automazed control systems on the base of controlled processes prognose imitation modeling and situational analysis. P. 181.

Modern shipbuilding characterizes with structural machine complexes and serve staff (crew) hierarchical integration, functioning in instability natural environment, external and internal perturbation actions. Such objects control complexity increasing. Collecting, processing and information flows coordination high-speed network centric systems appear. Despite of this, the task of the most important decision making belong to human-manager. In foreign and native practice there are active investigations in intelligent human-machine manager work stations building, which can represent prognostic risk evaluations as a result of controlled processes monitoring and imitation modeling. Such systems building must be based on prognostic imitation modeling, fuzzy logic, propositional algebra and neural nets.

Konyukh V. L. Validation of transporting's model. P. 189.

Validation comes to comparison of outputs for a system and a model under an equal input. It is suggested to seek an equality of flows for input and output of a model. Besides, a time between start of work and appearance of a flow at the end of transport network is calculated and simulated. The suggested methodology was checked for the underground transport network with 6 distributed sources of flows, 12 belt conveyors, and 5 bins.

Malykhanov A. A., Chernenko V. E. Method of parameters identification for agent-based traffic microsimulation based on GPS data. P. 203.

Calibration of microscopic traffic simulation models requires data collection with specialized equipment, which is expensive and often unavailable. For this case, a method of identification of agent parameters for microscopic traffic simulation is proposed. The method uses GPS-tracks to calculate real drivers' speed profiles. Based on these profiles, speed-related parameters of agents are determined. Software for automated processing GPS-data was developed. This software generates a data file that is further loaded to agent-based traffic model.

Muravyeva-Vitkovskaya L. Al. Estimation of characteristics for the priority model of a computer network link in the multiservice environment. P. 207.

An approximate calculation method is proposed to estimate characteristics of a priority model of a computer network link in a multiservice environment with non-Poisson traffic. Results of simulation experiments are used to evaluate the inaccuracy of the proposed method. Simulation is also used to find model parameters variation range at which proposed method can be used for engineering purposes.

Osipov A. B. Queuing system with several classes and time-consuming server switching. P. 214.

In this paper, simulation and calculation of queuing systems with multiple classes and time-consuming server switching. A description of the system, marked by its characteristic features. Presented a simulation model of the system in GPSS. A formula to calculate the system load. We are checking the calculated values using the simulation experiment. The recommendations that are useful for designing such systems.

Osipov V. Yu. Modeling and simulation marine transport systems which is based on intelligent geo-information systems. P. 219.

The approach to modeling of sea transport systems on the basis of intellectual geo-information systems (GIS) is considered. As an intellectual kernel such GIS it is offered to use the special associative machine including a neural network with operated spatial shifts of sets of individual images along layers. Unlike known approaches the offered method allows to expand essentially possibilities on intellectual processing of the dynamic diverse spatially correlated information, as in interests of the analysis flowing, and forecasting of the future events connected with sea transport systems.

Pavlov A. N. Aggregation-decomposition approach to the modeling of a controlled reconfiguration of a disaster tolerance information system (DTIS). P. 223.

The analysis of the problems associated with the solution of control reconfiguration DTIS. The main stages of aggregation-decomposition approach to the modeling of a controlled reconfiguration of the structural states DTIS is supposed.

Pankovsky I. Yu., Bobin A. V., Slatin A. V. The simulation technology of combat operations. P. 229.

The simulation technology for combat operation involving aviation, surface-to-air missile systems (SAMS), communications, funds acquisition, processing and communicating information is presented in this paper. It realized on modern personal computer. The purpose of this simulation development is given. The model design structure and simulation principles are shown. Using this simulation samples as a part of computer-aided system are represented.

Pertsev N. V., Leonenko V. N. Simulation of HIV infection spread based on stochastic recurrent equations. P. 234.

In this work we build and study a stochastic simulation model, describing the HIV infection spread in heterogeneous population. The simulation model of HIV spread is built, which is based on a system of stochastic recurrent equations. Here we also describe the computational algorithm and cite the analytical assessments on mathematical expectations of population groups' quantity. Simulation data is cited corresponding to two parameter sets: the case of disease conservation and the case of disease extinction.

Pesikov E. B. Analytical toolkit of the estimation and management of risks of the virtual enterprise on the basis of statistical modeling. P. 239.

One of possible approaches to construction of analytical toolkit of an estimation and management of risks of the virtual enterprise based on application of methods risk-management, statistical modelling and analytical imitating system "AnyLogic" is considered. The risk-factors, and also mathematical models of management of risks of the virtual enterprise are resulted the mathematical description of functioning of territorially distributed industrial system with the network organization in view of casual character. Questions of application оптимизационных models for management of risks and a choice of the best method of management are discussed by risks.

Razumov D. A., Aleshin V. D. Simulation models in life cycle of the automated control systems in crisis and extreme situations. P. 244.

Anthropogenic accidents of last years, practice of their overcoming besides methods and means on prevention of crisis situations make demands to designing and creation of the modern regional automated control systems. For support a initial activity phase of project is offered simulation model, approaches and problems of definition of parameters of models

Ryzhikov Yu. I. Modelling of multichannel priority systems. P. 250.

The expediency of direct imitation of the multichannel queueing systems in languages of Fortran type is shown. It is described the technology of imitation of similar systems, its generalizations are planned. Using imitating model the method is testing to compute average waiting and sojourn times of different demands in multichannel queueing systems with preemptive and non-preemptive priorities, based on invariant's relations.

Savina A. L. Mathematical aspects of construction agent-based model of migration flows. P. 255.

The article deals with mathematical aspects of the construction of agent-based model of migration flows. There are described the main principles of blurry estimates of living standards and the general decision-making model agent, that takes into account quantitative and qualitative characteristics of decision-making.

Savina O. A., Savina A. L. Algorithmic aspects of construction agent-based model of migration flows. P. 260.

The article deals with agent-based model of migration flows, based on the structuring agent behavior and determine the impact of its internal representation of the outside world on its activities. There are considered a general event-circuit model of migration flows and describes the algorithmic implementation of event sections.

Sokolov B. V., Ikonnikova A. V., Potryasaev S. A., Raginya E. A. The combined algorithms' for evaluation of control stability in complex technical systems. P. 269.

The methodological and methodical bases for organizing and carrying out of integrated simulation of complex technical systems (CTS) for evaluation of there control stability. The combined algorithms' for evaluation of control stability in complex technical systems are proposed.

Sosnin V. V. Queueing rules with preemption in GPSS. P. 274.

Queueing rules with preemption are analyzed. GPSS is used as a modeling tool. Recommendations as to how such rules should be constructed are given.

Stepantsov M. E. Simulating some scenarios of Russian and Ukrainian railway networks development. P. 282.

A dynamical model for a transport network development, created by the author is presented. The main feature of the model is that the network evolution takes place not under the centralized control, but as a self-organized process due to cargo demands and vertices development. Some scenarios of Russian and Ukrainian railway networks development were performed, using simulation systems based on that model.

Fridman A.Ya., Fridman O. V. Simulation Approach to Coordination of Complex Dynamical Systems. P. 286.

The paper introduces an investigation of efficiency of incremental coordination techniques for complex dynamical systems subjected to structural and/or parametrical disturbances. The investigation exemplified with linear controlled objects proved an extension of stability ranges for local control signals at applying the proposed incremental coordination.

Chadeev V.M., Aristova N.I. Models for simulating modeling of real economy. P. 291.

The model of real economy based on the formal description of technological operation is considered. Each type of technological operation is described by four parameters: time of performance of operation by the person and the robot, probability of correct performance of operation by the person and the robot. Is offered the algorithm, allowing to define optimum distribution of works between robots and people, by criterion of the minimum expenses of time of the person, including expenses for manufacturing of robots. The model described in the report, allows to find optimum distribution as analytically (for simple cases), and by means of simulating modeling.

Chertovskoy V. D. Planning process simulation of manufacturing technology line. P. 295.

The simulation problems of manufacturing technology line is considered. Variants of horizontal interaction of structural elements is studied.

Chukin D. Yu., Tregub I. V. Simulating the dynamics of the stock price by using random walk models with stable steps. P. 301.

The paper focuses on the simulation of the stock price by using random walk models. We used the stable distribution with infinite variance of price changes. Such a move would substantially improve the predictive quality of the simulation model.

Shorov A. V., Kotenko I. V. The set-theoretic representation of simulation models of infrastructure attacks and protection mechanisms against them. P. 306.

Protection of computer networks against infrastructure attacks is one of the biggest problems of computer security. To develop effective protection mechanisms from such attacks, we must investigate the mechanisms of attack implementation, types of attacks, and their impact on the target computer network as well as protection mechanisms against them. This paper presents the set-theoretical models used to create simulation models of the attack mechanisms and protection against them, including the bio-inspired protection mechanism based on the approach "nervous system of network".

Yudin E. B., Vasilev E. R. Neighborhood graph generation at agent-based modeling toolkit for re distributed computing platform RepastHPC. P. 311.

A generator of Neighborhood graph, realized at agent-based modeling and simulation toolkit for high performance distributed computing platform RepastHPC, is proposed. Neighborhood graph as generalization of classic percolation models (lattices) is considered.

* * *

Alexandrov V. V. Integrated Simulated Environment GPSS Cloud. P. 315.

The paper discusses concepts and architectural principles of cloud computer-aided simulation research systems. Cloud approach significantly reduces and unifies simulation research cycle for end users as well as provides for distributed and high-performance simulations. The paper describes both architecture and features of GPSS Cloud simulation framework. The framework creates an integrated SaaS simulation environment invariant to terminal hardware and software.

Alexandrov V. V., Alexandrova V. V., Zaytseva A. A. The cognitive simulation programming technology. P. 320.

The modern approaches to 3D-modeling, taking into account usage of technologies of rapid prototyping are described in the paper. The conceptual circuit of unitized cognitive programming system is offered and possibilities of its application in the modern systems of simulation modeling are described.

Alexandrov V. V., Sikachev V. Y. Controlled Airport Airspace Traffic Simulation Research System. P. 326.

The paper describes the airport airspace traffic simulation system designed to conduct research of airport airspace organization and capacity analysis. The system is also aimed at supporting and testing air traffic control procedures and tools under development.

Antonenko V. A., Volkanov D. Yu., Chistolinov M. V. HLA-compatible simulation model code generation tool. P. 331.

In this paper we present the code generation tool for simulation models described by UML statechart diagrams with the purpose using those models in High Level Architecture systems.

Babkin E. A., Razinkov V.V. Event simulation environment. P. 336.

We consider the organization, languages of visual modeling and programming of model of environment of event simulation modeling ESimPL oriented to training simulation modeling. The environment is based on the representation of behavior of discrete systems in the form of event-graph.

Bereznev E.V., Grigoriev R. N., Samoilov D. V., Slatin A. V., Maslennikov A. A. Software for three-dimensional visualization of simulation results. P. 341.

We review our cross-platform visualization tool, allowing to display the simulation results of different objects on the background of terrain models in a three-dimensional space. Visualization is performed in accordance with the information formed by different mathematical models and written in a special format, as in post-flight analysis, and in real time.

Garbarev A. Y. Implementation of web-oriented system of agentbased simulation system. P. 346.

In the article the original approach to the construction of web-oriented modeling system is given. The architecture of the developed system is reviewed. Some directions of system development are offered.

Deviatkov V. V., Isaev F. V. Universal form editor for GPSS World models. P. 350.

This article contains the description of new simulation research automation system – universal form editor for GPSS World models. Main functions, working principles and examples of practical applications are described. Advantages of the form editor are considered: automation of simulation research stages, ability to convert a GPSS World text model to a functional tool for conducting research.

Deviatkov V. V., Fedotov M. V. Extended editor for GPSS World. P. 355.

Article says about extended editor for GPSS World simulation models. It describes editor's means for model management, editing, processing and debugging. Authors offer approach to construct GPSS models as schemes that consist of user defined standard elements.

Zhukov M. V., Zolotuhin V. V. Satellite communication system operation simulation for reliability analysis and optimization. P. 360.

In this article contemporary satellite communication systems reliability analysis and optimization affairs using simulation are considered. Mathematical and discrete event simulation models (in the form of state chart) of satellite communication system operation are suggested.

Zakirov V. I., Zolotuhin V. V. Wireless communication network reliability analysis using simulation in AnyLogic. P. 365.

Wireless communication network operation simulation model in the conditions of internal and external destabilizing factors considered in this article. It could be applied to performance quality estimation and structural redundancy, protection against various kinds of attack optimization.

Krinetsky E. O., Shebeko Yu. A. Agent Based computer simulation paradigm for modeling the behavior of Grid-infrastructures. P. 370.

Developed a prototype simulation model of the behavior of Grid-infrastructures using agent-based paradigm. Building a simulation model was performed in stages, developing different types of agents to model the basic elements of the Grid-infrastructures, as well as algorithms for their interaction. The paper deals with a group of algorithms, where resource allocation mechanism is based on the division of space resources between tasks, resulting in each task receives the necessary resources for the required time in exclusive mode. Developed prototype is equipped with an interactive interface to reconfigure the Grid-infrastructure, all processed tasks, and enables the assessment of the mechanism of resource allocation.

Mishin D. V. About the Application in the Research of Efficiency Anylogic in Selection Algorithm Network Administrator. P. 373.

The article proposes a model administrator, algorithms for choosing the administrators of corporate data network. Formalizes the task of improving the effectiveness of restoration work in the corporate network. We consider a simulation model for automated system administration.

Morozov V. P. Means of automation of modeling of stream systems in the environment of MS Excel. P. 378.

The system of modeling realized in the environment of MS Excel is considered. The system is based on methodology of modeling on the basis of algorithmic networks and focused on subject knowledge of the end user

Rybakov V. N., Kuzmichev V.S. Design of virtual lab for gas turbine engine testing. P. 388.

Concept of construction of virtual lab for gas turbine engine testing is described. Virtual lab for gas turbine engine testing is one of components of gas turbine engine mathematical model and provides possibility for engine testing and determination of its performance parameters.

Ryabinin K. V. 3D visualization application for simulation system Triad.Net. P. 393.

Described an implementation of application for 3D visualization of simulation evaluated on Triad.Net. In view are the main architecture and technical details of this application and it's main features.

Fil Yu. Yu., Mikhailov V. V. Meteorological data preprocessing system. P. 398.

The most important abiotic factors, that have influence on ecosystems are climatic factors. There are different ways to get meteorological data. The most precise data is usually obtained from meteorological stations. However these data needs to be processed before it can be used in computer models, GIS etc. The article is devoted to Meteorological Data Preprocessing System.

Khubaev G. N., Shcherbakov S. M. Computer-aided generation of simulation models from UML-diagrams with SIM-UML. P. 404.

The computer-aided synthesis of business-process simulation models is discussed in the paper. The technique of simulation models construction on the basis of UML-diagrams is given. Functionality and features of the simulation system SIM-UML system SIM-UML are described.

Chemeritskiy E. V., Volkanov D. Y., Smeliansky R. L. Applicability of CERTI to simulation of DRE systems. P. 409.

This paper considers the possibility of the Distributed Real-time and Embedded (DRE) system simulation with CERTI, a tool based on the High Level Architecture (HLA) simulation standard. The paper presents a performance comparison of CERTI with a specialized DRE modeling and simulation tool. Making a critical analysis of the CERTI architecture, we propose some approaches to its further evaluation and attuning to the simulation of DRE systems.

Chernenko V. E., Malykhanov A. A. Logistic network simulation library. P. 414.

Advisory experience proves necessity of simulation for certain projects concerning logistics networks optimization. Logistics simulation toolset is not established, so common simulation tools are used for this purpose. In this paper we propose integration of (1) map image, (2) GIS objects custom information and (3) transportation network as a graph into a single object model. The library for AnyLogic platform dedicated to logistics network simulation was developed using the proposed approach. We also demonstrate the example of simulation-based project developed with the library.

Shpakov V. M. A Situation Approach to Implementation of Physics Simulation Models of Dynamic Systems. P. 419.

Advantages of physics simulation models of dynamic systems are discussed. An approach to such models implementation based on use of a situation-event formalism of an interacting hybrid process specification is proposed. This formalism is briefly stated and some ways of its use for physic simulation model implementation are shown. Facilities of the considered methods are illustrated by the examples of some simple dynamic system models implementations.

Yudin E. B., Zadorozhnyi V. N., Pender E. A. Random graphs with non-linear rule of preferential attachment in SIMBIGRAPH agentbased simulation system. P. 425.

The system SIMBIGRAPH for agent-based simulation is considered. The capabilities provided by SIMBIGRAPH for networks modeling are described. A generator of random graphs with non-linear rule of preferential attachment is used to investigate the stability of the Internet.

Пятая всероссийская научно-практическая конференция по
имитационному моделированию и его применению в науке
и промышленности

«ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»

ИММОД-2011

**Труды
конференции**

Том I

Подписано в печать 08.10.2011. Формат бумаги 60х90¹/₈.
Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная. Тираж 200 экз.

ОАО «Центр технологии и судостроения», 198095, Санкт-Петербург