

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 Дунато. 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.