

Краткий обзор методов и средств имитационного моделирования производственных систем

С. С. Журавлев

Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

Приведен краткий обзор развития средств имитационного моделирования. Описаны парадигмы имитационного моделирования, используемые при разработке имитационных моделей производственных систем, и процесс разработки модели. Проведен сравнительный анализ некоторых распространенных сред имитационного моделирования и сформулированы требования к средам имитации производственных систем.

Ключевые слова: имитационное моделирование, производственные системы, среды моделирования, сравнительный анализ.

A presented short overview describes: simulation tools progresses, approaches to simulation of manufacturing, description of model development process. A comparative analysis some of wide spread packages of simulation is given. Requirements to packages of simulation of manufacturing are formulated.

Key words: simulation, manufacturing, packages of simulation, comparative analysis.

Введение. В настоящее время автоматизация широко применяется во многих отраслях промышленности. Для обеспечения развития промышленности необходимы не только модернизация технологического оборудования и развитие автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), но и разработка средств анализа и оптимизации технологических процессов. Одним из инструментов для решения данных задач является моделирование.

Современные объекты управления обладают высокой степенью сложности (структурной, функционирования, выбора поведения и развития) [1], что значительно затрудняет использование аналитических методов исследования. В этом случае применение имитационного моделирования (ИМ) является более эффективным. В качестве примера можно привести работу [2], в которой осуществляется проверка алгоритмов АСУ ТП гидроэлектростанции.

Развитие ИМ началось в середине 60-х гг. XX в. [3] с использования универсальных языков программирования и статистических испытаний (метод Монте-Карло). Дальнейшее развитие обусловлено переходом к новой методологии разработки моделей – созданию подпрограмм, которые реализуют выполнение часто используемых операций и позволяют сократить время разработки моделей.

В 1961 г. появился специализированный язык ИМ – GPSS. Дальнейшее развитие было связано с разработкой специализированных языков моделирования дискретно-событийных (SIMSCRIPT, Q-GERT, SIMULA, SLAM, GASP IV, SIMAN) и непрерывных (CSMP III, CSSL III, CSSL IV, ASCL, DARE-P) моделей. Основным недостатком использования таких инструментов является необходимость знания специализированного языка.

В начале 90-х гг. XX в. были разработаны интегрированные средства ИМ для ЭВМ, например Симула 67 МВК "Эльбрус".

В середине 90-х гг. XX в. началось развитие универсальных и специализированных сред ИМ, обусловленное быстрым развитием персональных ЭВМ. Новое поколение сред ИМ (Arena, Extend и др.) позволило разрабатывать и проводить имитационные эксперименты без знания специализированных языков. К концу 90-х гг. XX в. были разработаны специализированные среды имитационного моделирования, отличающиеся от универсальных сред наличием библиотек и шаблонов элементов производственных систем. К 2000 г. было создано более 50 сред ИМ [4].

В России активное использование универсальных и специализированных сред ИМ для персональных ЭВМ началось в конце XX в. Этому способствовали следующие факторы.

1. Проведение регулярных всероссийских научных мероприятий по ИМ. В октябре 2003 г. состоялась первая всероссийская конференция по имитационному моделированию ИММОД, проводимая раз в два года.
2. Создание портала GPSS [5], содержащего информацию о литературе и мероприятиях по ИМ.
3. Появление современной литературы и материалов конференций (ИММОД, МОДС, Winter Simulation Conference и др.), находящихся в свободном доступе.
4. Разработка отечественной универсальной среды имитационного моделирования AnyLogic фирмой "XJ Technologies".

В работе [6] приведен график сравнительного роста числа российских и зарубежных организаций, пользующихся услугами компании "XJ Technologies". В период с 2000 по 2007 гг. доля российского рынка компании "XJ Technologies" увеличилась более чем на 25 % всех заказов на имитацию систем. Наибольший интерес к применению имитационных моделей отмечается в логистике, производстве и бизнесе.

Основными факторами, ограничивающими развитие ИМ, являются нехватка квалифицированных кадров и использование нерациональных методов [6]. Среди частных проблем можно отметить [1] неоптимальную разработку имитационных моделей, отсутствие эффективной машинной реализации, несоблюдение компромисса между универсальностью и прикладной областью.

1. Парадигмы имитационного моделирования. Существует четыре основных подхода ИМ [7]: динамическое моделирование, системная динамика (СД), дискретно-событийный (ДС) и агентное моделирование. Также следует отметить метод статистических испытаний – метод Монте-Карло (МК).

Динамические системы (механические или физические процессы, системы управления) описываются алгебраическими уравнениями, дифференциальными уравнениями и блок-схемами.

Системная динамика разработана в 60-х гг. XX в. Дж. В. Форрестером. Системно-динамический подход представляет собой мощный инструмент для исследования динамических процессов, направленный на изучение сложных систем с обратной связью (производственные, социально-экономические и др.) [8]. Процессы представляются в виде диаграммы, состоящей из петель положительной и отрицательной обратной связи. Главное внимание уделяется моделированию обратных связей.

Результатом моделирования СД-модели является выявление глобальных зависимостей и причинно-следственных связей в исследуемой системе.

Дискретно-событийный подход разработан в начале 60-х гг. XX в. Дж. Гордоном. В отличие от СД модельное время продвигается либо от события к событию (событийно-ориентирован), либо через дискретные промежутки времени (процессно-ориентирован). Дискретно-событийный подход применяется в случае, если можно считать, что переменные системы изменяются мгновенно в определенные моменты времени. Для представления ДС-моделей применяется методология событийного графа [9].

Дискретно-событийное моделирование – наиболее распространенный подход ИМ, сфера его применения очень обширна: логистика, социально-экономические процессы, промышленность и др.

Развитие идей агентного моделирования началось в 70-х гг. XX в., но как парадигма подход сформировался в 90-х гг. XX в. Основой агентного моделирования является понятие "агент" – некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, которая может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться [7]. Ключевыми элементами агентного моделирования являются карты состояний. Агентное моделирование применяется для имитации интеллектуальных, децентрализованных и распределенных систем с целью получения сведений о влиянии на систему функционирования и взаимодействия элементов.

Метод Монте-Карло – численный метод решения математических задач с помощью моделирования случайных величин [10], разработанный в 1949 г. Дж. Нейманом и С. Улама. Метод статистических испытаний позволяет моделировать любой процесс, на протекание которого оказывают влияние случайные факторы. Метод используется во многих областях науки (математике, физике и др.).

Сущностью метода Монте-Карло является применение какого-либо генератора равномерно распределенных случайных чисел в связи с функцией распределения вероятностей изучаемого процесса [11]. После определения функции на основе теоретического, эмпирического или другого распределения, соответствующего характеру изучаемого процесса, производятся случайные выборки, представляющие значения входных данных. С помощью множественных прогонов имитационной модели получается соответствие множеств значений входных и выходных параметров. На заключительном этапе осуществляется принятие решений с помощью статистического анализа выходных данных.

2. Методика создания имитационных моделей и этапы ИМ. После выбора подхода ИМ производится разработка имитационной модели. Описание процесса моделирования приведено в работах А. М. Лоу [12] и В. Л. Коноха [13]. Данный процесс включает следующие этапы.

1. Точная формулировка цели исследования.
2. Сбор информации и данных.
3. Разработка концептуальной модели. Для проверки компонентов модели применяются количественные методы – графики, критерии согласия, тест Крускал-Уолиса (Kruskal-Wallis).
4. Проверка концептуальной модели на адекватность поставленной задаче и выполнение структурного критического анализа.
5. Перевод концептуальной модели с помощью программных средств в машинное представление.
6. Верификация запрограммированной модели. На этом этапе выполняются анализ чувствительности и валидация выходных данных имитационной модели (если реальная система существует, для сравнения выходных данных модели и реальной системы применяются статистические методы).
7. Если адекватность модели не подтверждается, в зависимости от обнаруженной ошибки необходимо вернуться к первому, второму или третьему шагу.
8. Разработка, выполнение и анализ экспериментов.
9. Документирование и представление полученных результатов.

Для того чтобы достигнуть наибольшей адекватности модели, при ее разработке необходимо взаимодействовать с предметными экспертами и заказчиками проекта. Также для обеспечения более простой валидации и верификации применяется анимация модели.

Необходимо отметить, что верификация и валидация являются одними из важных аспектов моделирования [14]. Существует два основных подхода выполнения верификации и валидации, обеспечивающих наибольшую адекватность модели: пользователем, полностью вовлеченным в группу разработчиков (увеличивает правдоподобность); независимая верификация и валидация, выполняемая другой группой (применяется для больших моделей).

Методы валидации могут быть различными: анимация, сравнение с другими моделями, дегенеративные тесты, событийная адекватность, тесты на экстремальные условия, историческая валидация данных, операционные графики, вариация параметров (анализ чувствительности) и др.

Однако следует учитывать, что при увеличении достоверности модели возрастает ее стоимость, а при превышении определенного порога достоверности затраты становятся неоправданно большими.

3. Краткий обзор сред ИМ для имитации производственных систем. Имитационное моделирование может успешно применяться в исследовании производственных систем. Например, имеется опыт использования программных продуктов имитационного моделирования в горном деле, машиностроении, теплофизике и энергосберегающих технологиях [15].

Задачи, решаемые ИМ для исследования производственных систем, можно разделить на три основные группы [16]: определение потребности в оборудовании, оценка производительности, оценка технологических операций.

В работе [17] приведены характеристики более 50 современных сред ИМ. В [18, 19] с использованием материалов конференции Winter Simulation Conference за 2005, 2008 гг. проведено сравнение количества и общего объема публикаций о средах ИМ. На основе данных этих источников можно считать, что одними из наиболее распространенных сред являются Arena [20–22], Extend [23–25], AnyLogic [26, 27], AutoMod [28–30], Promodel [31, 32], характеристики которых приведены в таблице.

Характеристики некоторых наиболее распространенных сред ИМ

Характеристика среды	Arena	ExtendSim	Anylogic	Automod	Promodel
Год выпуска	1998	1988	1999	1999	1999
Разработчик	Rockwell Software	Imagine That, Inc.	XJ Technologies	Applied Materials Inc.	PROMODEL Corporation
Специализированный язык	Нет	ModL	Java	Встроенный язык	Встроенный язык
Вид библиотек	Стандартные	Стандартные	Стандартные	Настраиваемые шаблоны	Настраиваемые шаблоны
Создание пользовательских библиотек и шаблонов	Есть	Есть	Есть	Нет	Нет
Связь с внешними приложениями	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Анимация	Трехмерная	Трехмерная	Трехмерная	Трехмерная	Трехмерная
Документирование	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Импорт чертежей	Есть	Нет	Есть	Есть	Есть
Парадигмы ИМ: а) динамические системы	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет
б) системная динамика	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет
в) дискретно-событийное моделирование	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
д) агентное моделирование	Нет	Есть	Есть	Нет	Нет
е) комбинированный подход	Нет	Есть	Есть	Нет	Нет
Иерархия	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Модуль оптимизации	OptQuest	Встроенный	OptQuest	AutoStat	SimRunner
Потоки случайных чисел	Неограниченное число	Неограниченное число	Неограниченное число	Неограниченное число	100 потоков
Стандартные теоретические распределения	12	18	29	7	20
Эмпирические распределения	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Независимые прогоны моделируемой системы	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Разработка сценариев	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Планирование статистических экспериментов	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Интерактивный отладчик	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Разработка интерфейса для пользователя модели	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет
Операционная система, версия не ниже	Windows 2000	Windows 2000, Mac OS X 10.4	Windows 2000, Apple Mac OS X 10.4, SuSE Open Linux 10.2, Ubuntu Linux 7.04	Windows XP	Windows 2000
Рекомендуемые требования к оперативной памяти	256 Мб (512 Мб и более)	256 Мб (2 Гб)	1 Гб	512 Мб	512 Мб (2 Гб)
Наличие демоверсии	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет

Для сравнения необходимо задать критерии анализа. Наиболее важными являются следующие параметры сред ИМ [16].

1. Основные характеристики, в число которых входят следующие возможности: использование различных парадигм ИМ, описание логики поведения объекта на встроенном языке, простота освоения среды моделирования, поддержка иерархического моделирования сложных систем, возможность интерактивной отладки и разработки интерфейса для пользователя модели, импорт и экспорт данных, обеспечение разработки сценариев моделирования, поддержка непрерывно-дискретного моделирования, связь среды ИМ с другим программным обеспечением.

2. Требования к оборудованию и программному обеспечению – объем оперативной памяти, вид и версия операционной системы.

3. Реализация анимации и динамической графики, обеспечивающих визуализацию модели и отображение ее параметров (часы, шкалы, графики и т. д.).

4. Различные статистические возможности, такие как возможность задания потоков независимых случайных величин, возможность задания эмпирических распределений, осуществление независимых прогонов модели, планирование проведения статистических экспериментов, оптимизация параметров модели.

5. Поддержка пользователя среды (наличие справочного материала, демоверсии и осуществление технической поддержки).

6. Формирование отчетов с выходными данными, графиками, диаграммами, оценкой параметров модели и т. д.

Разработка всех рассмотренных сред ИМ начата в конце XX в. и связана с быстрым развитием аппаратной базы ЭВМ. Среда ИМ обладают следующими возможностями: предоставления визуального интерфейса разработки моделей, что облегчает их применение для непрограммирующего пользователя; поддержки иерархии в структуре модели, обеспечивающей четкую и наглядную структуру; обеспечения связи с внешними приложениями; трехмерной анимации; документирования; отладки; анализа; оптимизации модели имитируемой системы. На сайтах разработчиков рассмотренных сред ИМ (кроме "PROMODEL Corporation") можно загрузить демоверсию среды.

Отличительными особенностями приведенных сред ИМ являются наличие специализированного языка, вид библиотеки элементов, возможность создания пользовательских библиотек и шаблонов, импорт чертежей, парадигмы моделирования, возможность разработки интерфейса для пользователя модели, требования к оперативной памяти и программному обеспечению ЭВМ. Рассмотрим эти различия более подробно.

Специализированные среды ИМ отличаются поддержкой, в качестве шаблонов, уже созданных объектов, имитирующих элементы и процессы производства. Универсальные среды могут имитировать производственные системы, но для разработки модели требуются большие затраты времени. Однако у них имеется возможность создания пользовательских библиотек и шаблонов.

Все рассмотренные среды, за исключением Extend, поддерживают импорт чертежей из систем автоматизированного проектирования (например, AutoCad).

Рассматриваемые среды позволяют создавать модели непрерывных и дискретных систем с помощью ДС-подхода.

Среда ИМ AnyLogic имеет ряд преимуществ: наличие всех парадигм ИМ (высокая гибкость выбора подхода); возможность выбора между парадигмами или применение комплексного подхода; обладает всеми свойствами, необходимыми для разработки имитационных моделей. Данная среда предоставляет возможность экспортировать разработанную модель в приложение или апплет, обеспечивая этим доступность применения результатов исследования заказчиками проекта. AnyLogic разработана на универсальном языке программирования Java, что позволяет среде не зависеть от вида операционной системы. Отметим, что AnyLogic является одной из наиболее распространенных сред ИМ в России (более 30 % моделей, представленных на конференции ИММОД-2009 [33, 34], разработано в среде AnyLogic) и применяется в различных областях: производственных, социально-экономических, транспортных и др. Например, в угольной промышленности возможные варианты имитации: конвейерный транспорт, проходческое оборудование, логистика, автомобильный и железнодорожный транспорт, процесс развития предприятия и др.

Заключение. Независимо от выбранного подхода, важнейшими факторами разработки имитационных моделей являются правильно поставленная задача, корректность исходных данных и адекватность модели. Также в те-

чение всего процесса разработки имитационной модели особое внимание необходимо уделять документированию и визуализации полученных результатов, что облегчает повторное применение и улучшает достоверность модели.

В зависимости от необходимого уровня абстракции для имитации производственных систем можно применять различные парадигмы ИМ. Например, на уровне глобальных взаимосвязей применяется СД. Для моделирования процессов производства применим ДС-подход. Оценку влияния поведения элементов на функционирование системы можно реализовать с помощью агентного моделирования. Применение смешанного подхода позволяет изучать систему на нескольких уровнях абстракции.

Анализируя результаты сравнения сред ИМ, можно констатировать, что среда имитации производственных систем должна обладать развитыми стандартными библиотеками; возможностью создавать пользовательские библиотеки и шаблоны; связью с внешними приложениями; трехмерной анимацией для четкого представления процесса имитации; возможностью использования нескольких подходов или их комбинации для обеспечения максимальной гибкости моделирования; поддержкой иерархии для обеспечения имитации сложных систем; развитыми средствами документации, анализа и оптимизации. Необходимо также выделить две особенности: независимость от операционной системы (значительно расширяет возможности разработки и презентации моделей) и разработка интерфейса для пользователя модели (позволяет заказчику не покупать дорогостоящую среду ИМ и обеспечивает разработчикам модели сохранение коммерческой тайны).

Список литературы

1. РЫЖИКОВ Ю. И., СОКОЛОВ Б. В., ЮСУПОВ Р. М. Проблемы теории и практики имитационного моделирования // Сб. докл. III Всерос. науч.-практ. конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД-2007). Санкт-Петербург, 17–19 окт. 2007. Т. 1. С. 58–70.
2. ЗАХАРЧЕНКО В. Е. Имитационная модель гидроагрегата для тестирования алгоритмов АСУ ТП // Автоматизация в промышленности. 2007. № 7. С. 37–40.
3. КОНЮХ В. Л., ИГНАТЬЕВ Я. Б., ЗИНОВЬЕВ В. В. Развитие средств имитационного моделирования // Сб. докл. II Всерос. науч.-практ. конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД-2005). Санкт-Петербург, 19–21 окт. 2005. Т. 1. С. 122–126.
4. ELLIOTT M. Buyer's guide simulation // IEE Solutions. 2000. № 5. P. 55–64.
5. Имитационное моделирование систем. [Электрон. ресурс]. <http://www.gpss.ru/>.
6. БОРЩЕВ А. В. Применение имитационного моделирования в России – состояние на 2007 г. // Сб. докл. III Всерос. науч.-практ. конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД-2007). Санкт-Петербург, 17–19 окт. 2007. Т. 1. С. 11–16.
7. БОРЩЕВ А. В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика // Exponenta PRO. 2004. № 3/4 (7/8). С. 38–47.
8. ФОРРЕСТЕР ДЖ. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / Под ред. Д. М. Гвишиани. М.: Прогресс, 1971.
9. SCHRUBEN L. Simulation modeling with event graphs // Communications of the ACM 26. 1983. P. 957-963.
10. ЕРМАКОВ С. М., МИХАЙЛОВ Г. А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982.
11. RAYCHAUDHURI S. Introduction to Monte Carlo simulation // Proc. of the Winter Simulation Conf. Miami (USA), 7–10 Dec. 2008. P. 91–100.
12. LAW A. M. How to build valid and credible simulation models // Proc. of the Winter Simulation Conf. Miami (USA), 7-10 Dec. 2008. P. 39–47.
13. КОНЮХ В. Л., ИГНАТЬЕВ Я. Б., ЗИНОВЬЕВ В. В. Методы имитационного моделирования систем. Применение программных продуктов. [Электрон. ресурс]. Электронное изд. зарег. в Федеральном депозитарии электронных изданий, № 0320401123. Рег. свид. ФГУП НТЦ "Информрегистр" от 06.09.2004, № 4753.
14. SARGENT R. G. Verification and validation of simulation models // Proc. of the Winter Simulation Conf. Miami (USA), 7–10 Dec. 2008. P. 157–169.
15. ЗИНОВЬЕВ В. В., ГРЕЧИШКИН П. В. Практическое применение программных средств имитационного моделирования // Сб. докл. III Всерос. науч.-практ. конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД-2007). Санкт-Петербург, 17–19 окт. 2007. С. 78–82.

16. ЛОУ А. М., КЕЛЬТОН А. Д. Имитационное моделирование. 2004.
17. SWAIN J. J. Discrete event simulation software: New frontiers in simulation // OR/MS Today. 2007. V. 34, N 5. P. 32–43.
18. Сравнение Rockwell Automation Arena с другими инструментами моделирования. [Электрон. ресурс]. <http://www.interface.ru/home.asp?artId=20152>.
19. МЕЛИА G., MARTINEZ D., TORRES F. Modeling and development of an Arena interface for Petri nets. A case study in a Colombian cosmetics company // Proc. of the Winter Simulation Conf. Miami (USA), 7–10 Dec. 2008. P. 1368–1375.
20. ВАРАТ V., STURROCK D. T. The Arena product family: enterprise modeling solutions // Proc. of the Winter Simulation Conf. New Orleans (USA), 7–10 Dec. 2003. P. 210–217.
21. Arena, Rockwell Software. [Электрон. ресурс]. <http://www.arenasimulation.com/>.
22. Обзор продуктов семейства Arena. [Электрон. ресурс]. <http://www.interface.ru/home.asp?artId=66&vId=20>.
23. KRAHL D. Extend: An interactive simulation tool // Proc. of the Winter Simulation Conf. New Orleans (USA), 7–10 Dec. 2003. P. 188–196.
24. KRAHL D. ExtendSim 7 // Proc. of the Winter Simulation Conf. Miami (USA), 7–10 Dec. 2008. P. 215–221.
25. Imagine That, Inc. [Электрон. ресурс]. <http://www.extendsim.com>.
26. КАРПОВ Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2009.
27. XJ Technologies. [Электрон. ресурс]. <http://www.xjtek.ru>.
28. ROHRER M. W. Maximizing simulation ROI with AutoMod // Proc. of the Winter Simulation Conf. New Orleans (USA), 7–10 Dec. 2003. P. 201–209.
29. LEBARON T., JACOBSEN C. The simulation power of AutoMod // Proc. of the Winter Simulation Conf. Washington (USA), 9–12 Dec. 2007. P. 210–218.
30. Applied Materials Inc. [Электрон. ресурс]. <http://www.automod.com/>.
31. HARRELL C. R. Simulation modeling using Promodel technology // Proc. of the Winter Simulation Conf. New Orleans (USA), 7–10 Dec. 2003. P. 175–181.
32. PROMODEL Corporation. [Электрон. ресурс]. <http://www.promodel.com/>.
33. Сб. докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД-2009). Санкт-Петербург, 21–23 окт. 2009. Т. 1. С. 350.
34. Сб. докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД-2009). Санкт-Петербург, 21–23 окт. 2009. Т. 2. С. 356.

*Журавлев Сергей Сергеевич – аспирант, Конструкторско-технологический ин-т
вычисл. техники СО РАН; e-mail: s-zhur@yandex.ru*