

тан основанный на многокритериальной линейной оптимизации алгоритм решения линейной двухуровневой задачи на основе методики поиска эффективных точек, предложенный в работе [6].

Список литературы

1. Pipiya G.T., Chernenkaya L.V. Optimization and decision-making strategies with respect to product quality in the presence of several objective functions // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2022. – 51(7). – С. 689–701.
2. Noghin V.D. Reducing the Pareto set based on set-point information // Scientific and Technical Information Processing. – 2011. – Vol. 38. – No 6. – Pp. 435–439.
3. Zhang G., Lu J., Gao Y. Multi-level decision-making. – Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. – 377 p.
4. Dempe S. Foundations of bilevel programming. – Springer Science & Business Media, 2002.
5. Bard J.F. Practical bilevel optimization: algorithms and applications. – Springer Science & Business Media, 2013. – Vol. 30.
6. Fülöp J. On the equivalence between a linear bilevel programming problem and linear optimization over the efficient set // Techn. Rep. WP. – 1993. – P. 93.
7. Glackin J., Ecker J.G., Kupferschmid M. Solving bilevel linear programs using multiple objective linear programming // Journal of optimization theory and applications. – 2009. – Vol. 140. – Pp. 197–212.

УДК 681.3(007)

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-36

*Речинский Александр Витальевич*¹,

проректор по экономике и финансам, канд. техн. наук;

*Черненькая Людмила Васильевна*²,

профессор, д-р техн. наук, профессор;

*Черненький Андрей Владимирович*³,

канд. экон. наук, доцент

СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

^{1, 2, 3} Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

^{1, 2} ludmila@qmd.spbstu.ru, ³ andrey@qmd.spbstu.ru

Аннотация. Имитационное моделирование применяется как системообразующее и наиболее ответственное звено процесса принятия решения, поэтому используется совместно с другим программным обеспечением для принятия решений в информационных системах различного назначения. В статье введены базовые понятия и рассмотрены математические основы имитационного моделирования. Описаны этапы развития, основы построения, направления развития и особенности реализации имитационного моделирования.

Ключевые слова: имитационное моделирование, принятие решений, метод Монте-Карло, дискретно-событийное моделирование, системная динамика, агентное моделирование.

*Aleksandr V. Rechinskiy*¹,
Vice-Rector on Economy and Finances, Candidate of Technical Science;
*Ludmila V. Chernenkaya*²,
Professor, Doctor of Technical Sciences;
*Andrei V. Chernenkii*³,
Associate Professor, Candidate of Economic Sciences

FORMATION AND DEVELOPMENT OF SIMULATION MODELING

^{1, 2, 3} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia;

^{1, 2} ludmila@qmd.spbstu.ru, ³ andrey@qmd.spbstu.ru

Abstract. Simulation modeling is used as a system-forming and the most responsible link in the decision-making process, therefore it is used in conjunction with other software for decision-making in information systems for various purposes. The article introduces the basic concepts and considers the mathematical foundations of simulation modeling. The stages of development, the basics of construction, the directions of development and the features of the implementation of simulation modeling are described.

Keywords: simulation modeling, decision-making, Monte Carlo method, discrete event modeling, system dynamics, agent modeling.

Введение

История развития имитационного моделирования насчитывает более 80 лет. Многие моделирующие системы, идеологически разработанные в 1970-1980-х гг., претерпели эволюцию вместе с компьютерной техникой и операционными системами и эффективно используются в настоящее время на новых компьютерных платформах. В конце 1990-х гг. появились принципиально новые моделирующие системы, концепции которых не могли появиться раньше при использовании ЭВМ и операционных систем 1970-1980-х гг.

В последнее десятилетие в связи с появлением объектно-ориентированных визуальных инструментальных средств и высокопроизводительных персональных компьютеров имитационное моделирование постепенно становится повседневным инструментом для разработчиков самых различных проектов: транспортных, промышленных, медицинских, военных и т. п.

Имитационное моделирование (от англ. simulation) — это распространенная разновидность моделирования, реализуемого с помощью набора математических инструментальных средств, специальных имитирующих компьютерных программ и технологий программирования, позволяющих посредством процессов-аналогов провести целенаправленное исследование структуры и функций реального сложного процесса в памяти компьютера в режиме имитации, выполнить оптимизацию некото-

рых его параметров. Имитационное моделирование невозможно выполнить без помощи компьютерных средств, поэтому часто для этого вида моделирования используется синоним компьютерное моделирование.

1. Математические основы имитационного моделирования

В самом общем виде структуру имитационной модели можно представить математически в виде:

$$R = f(x[i], y[j]),$$

где R (Result) — результат действия системы; $x[i]$ — переменные и параметры, которыми мы можем управлять; $y[j]$ — переменные и параметры, которыми мы управлять не можем; f — функциональная зависимость между $x[i]$ и $y[j]$, которая определяет R .

Каждая модель представляет собой некоторую композицию составляющих: компоненты, переменные, параметры, функциональные зависимости, ограничения, целевые функции.

Для создания имитационной модели необходимо специальное программное обеспечение — система моделирования (simulation system). Специфика такой системы определяется технологией работы, набором языковых средств, сервисных программ и приемов моделирования.

Имитационная модель должна отражать большое число параметров, логику и закономерности поведения моделируемого объекта во времени (временная динамика) и в пространстве (пространственная динамика).

С точки зрения специалиста имитационное моделирование контролируемого процесса или управляемого объекта — это высокоуровневая информационная технология, которая обеспечивает два вида действий, выполняемых с помощью компьютера:

- 1) работу по созданию или модификации имитационной модели;
- 2) эксплуатацию имитационной модели и интерпретацию результатов.

Математической основой имитационного моделирования является ряд предельных теорем:

1. Теорема Бернулли: при неограниченном увеличении числа опытов, частота появления события сводится к вероятности события.

2. Теорема (Ребышева): при неограниченном количестве числа опытов среднее арифметическое наблюдаемых величин сходится к математическому ожиданию этих величин.

3. Центральная предельная теорема: закон распределения суммы случайных величин при неограниченном увеличении числа слагаемых стремится к нормальному закону распределения.

По типу математического аппарата различают модели:

- линейного и нелинейного программирования;

- корреляционно-регрессионные;
- матричные;
- сетевые;
- теории игр;
- теории массового обслуживания и т. д.

Имитационные модели как подкласс математических моделей можно классифицировать на статические и динамические; детерминированные и стохастические; дискретные и непрерывные.

Класс задачи предъявляет определенные требования к имитационной модели. Так, при статической имитации расчет повторяется несколько раз в различных условиях проведения эксперимента, исследование поведения объекта осуществляется в определенный короткий период времени. При динамической имитации моделируется поведение системы в течение продолжительного периода времени без изменений условий. При стохастической имитации в модель включаются случайные величины с известными законами распределения; при детерминированной имитации эти возмущения отсутствуют, т. е. их влияние не учитывается [1–3].

В моделях применяются два основных способа изменения модельного времени: пошаговый и событийный. В соответствии с этим различают непрерывные, дискретные и непрерывно-дискретные имитационные модели. В непрерывных имитационных моделях переменные изменяются непрерывно, состояние моделируемой системы меняется как непрерывная функция времени и, как правило, это изменение описывается системами дифференциальных уравнений. В дискретных имитационных моделях переменные изменяются дискретно в определенные моменты имитационного времени (наступления событий). Динамика дискретных моделей представляет собой процесс перехода от момента наступления очередного события к моменту наступления следующего события. Поскольку в реальных системах непрерывные и дискретные процессы часто невозможно разделить, были разработаны непрерывно-дискретные модели, в которых совмещаются механизмы продвижения времени, характерные для этих двух процессов.

2. Метод Монте-Карло

Результаты имитационного моделирования работы стохастической системы являются реализациями случайных величин или процессов. Поэтому для нахождения характеристик системы требуется многократное повторение и последующая обработка данных. Чаще всего в этом случае применяется разновидность имитационного моделирования — статистическое моделирование (или метод Монте-Карло), то есть воспроизведение в моделях случайных факторов, событий, величин, процессов, полей. По результатам статистического моделирования определяют оценки вероятностных критериев качества, общих и частных, характеризующих

функционирование и эффективность управляемой системы. Получение выборок по методу Монте-Карло — основной принцип компьютерного моделирования систем, содержащих стохастические или вероятностные элементы.

Согласно методу Монте-Карло проектировщик может моделировать работу тысячи сложных систем, управляющих тысячами разновидностей подобных процессов, и исследовать поведение всей группы, обрабатывая статистические данные. Другой способ применения этого метода заключается в том, чтобы моделировать поведение системы управления на большом промежутке модельного времени (несколько лет), причем время выполнения моделирующей программы на компьютере может составить доли секунды.

В различных задачах, встречающихся при создании сложных систем, могут использоваться величины, значения которых определяются случайным образом. Теоретической основой метода Монте-Карло являются предельные теоремы теории вероятностей. Они гарантируют высокое качество статистических оценок при весьма большом числе испытаний. Метод статистических испытаний применим для исследования как стохастических, так и детерминированных систем.

Многим специалистам термин «метод Монте-Карло» иногда представляется синонимом термина «имитационное моделирование», что в общем случае неверно. Имитационное моделирование — это более широкое понятие.

3. Развитие имитационного моделирования

При развитии имитационного моделирования сформировались три основных направления:

1. Дискретно-событийное моделирование — подход к моделированию, применяемый для моделирования производственных процессов. Данный подход предлагает абстрагироваться от непрерывной природы событий и рассматривать только основные события моделируемой системы, такие как: «ожидание», «обработка заказа», «движение с грузом», «разгрузка» и другие. Дискретно-событийное моделирование наиболее развито и имеет обширную сферу приложений — от логистики и систем массового обслуживания до транспортных и производственных систем.

2. Системная динамика — парадигма моделирования, где для исследуемой системы строятся графические диаграммы причинных связей и глобальных влияний одних параметров на другие во времени, а затем созданная на основе этих диаграмм модель имитируется на компьютере. Такой вид моделирования более других парадигм помогает понять суть происходящего выявления причинно-следственных связей между объектами и явлениями. С помощью системной динамики строят модели бизнес-процессов, развития городов, модели производства, динамики попу-

ляции, экологии, развития эпидемии. Метод основан Форрестером в 1960-х годах.

3. Агентное моделирование — относительно новое (1990-е – 2000-е гг.) направление в имитационном моделировании, которое используется для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами (как в других парадигмах моделирования), а наоборот, когда эти глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности членов группы. Цель агентных моделей — получить представление о глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении ее отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе. Агент — некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться.

Дальнейшее развитие методов имитационного моделирования непосредственно связано с развитием инструментальных средств. В каждом из направлений развиваются свои инструментальные средства, упрощающие разработку моделей и их анализ. Данные направления (кроме агентного моделирования) базируются на концепциях и парадигмах, которые появились и были зафиксированы в инструментальных пакетах моделирования несколько десятилетий назад и с тех пор не изменялись. Огромное разнообразие современных инструментальных средств имитационного моделирования не позволяет провести анализ в рамках данной статьи [4–8].

Стремительное развитие компьютерного моделирования оказывает существенное влияние на все сферы жизнедеятельности человека, во многом упрощая и улучшая его жизненные условия. В мире информационных технологий имитационное моделирование переживает второе рождение [9–11]. Интерес к этому виду компьютерного моделирования оживился в связи с существенным технологическим развитием систем моделирования, которые на сегодняшний день являются мощным аналитическим средством, вобравшим в себя весь арсенал новейших информационных технологий, включая развитые графические оболочки для целей конструирования моделей и интерпретации выходных результатов моделирования, мультимедийные средства и видео, поддерживающие анимацию в реальном масштабе времени, объектно-ориентированное программирование, Internet — решения и др. Модели системной динамики применяются совместно с дифференциальными уравнениями балансового типа, а также в сочетании с принципами и методами логистики, основанными на оптимизации, управлении, интеграции потоков в сложных системах. Перспективно применение компьютерного моделирования в сочетании с другими методами принятия решений, интеллектуальными

технологиями, экспертными процедурами, реализация имитационно-оптимизационных вычислительных процедур на основе компенсационных подходов.

Заключение

Рассмотрены основы построения, этапы развития и особенности реализации имитационного моделирования. В современном мире имитационное моделирование становится все более распространенным и применяется как системообразующее и наиболее ценное звено процесса принятия решения, поэтому используется совместно с другим программным обеспечением для принятия решений в информационных системах различного назначения: корпоративных информационных системах, системах автоматизированного проектирования, системах поддержки принятия решений и других.

Список литературы

1. Кобелев Н.Б. Основы имитационного моделирования сложных экономических систем. – М.: Дело, 2003. – 336 с.
2. Шрейдер Ю.А. (ред.) Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) / Авторы глав Н.П. Бусленко, Д.И. Голенко, И.М. Соболев, В.Г. Срагович, Ю.А. Шрейдер. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 334 с.
3. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Перевод с англ. / Пер. И.И. Грушко; ред. В. И. Нейман – М.: Машиностроение, 1979. – 432с.
4. Томашевский В.М., Жданова Е.Г. Имитационное моделирование в среде GPSS. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.
5. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.
6. Сталл Ингольф. GPSS – 40 лет развития / Пер. В.В. Девяткова // Портал gpss.ru, 2001. – URL: http://www.gpss.ru/paper/stahl/index_w.html.
7. Moler Cleve. The origins of MATLAB® // MathWorks.com, 2004. – URL: http://www.mathworks.com/company/newsletters/news_notes/clevescorner/dec04.html.
8. Moler Cleve. The growth of MATLAB® and the MathWorks over two decades // MathWorks.com, 2006. – URL: <http://www.mathworks.com>.
9. Лычкина Н.Н. Современные технологии имитационного моделирования и их применение в информационных бизнес-системах // «Новые информационные технологии». Тезисы докладов XV Международной студенческой школы-семинара – М.: МИЭМ, 2006. – С. 64–73.
10. James J. Swain simulation software survey // The Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), <http://www.informs.org>, 2010. – URL: <http://www.orms-today.org/surveys/Simulation/Simulation.html> (date of access: 10.11.2023).
11. Речинский А.В., Станкевич Л.А., Черненькая Л.В. Экспертные системы. Архитектура и примеры реализации: учеб. пособие / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022 – 162 с.