Key words: emission spectrum of propulsion systems operating on liquid and solid fuels, spectral emission lines of propellant components of fuels, remote analysis.

Zakutaev Alexander Alexandrovich, head of laboratory of military institute (research), zakutaev.a@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy of Mozhaisky,

Oleynikov Maksim Ivanovich, candidate of technical sciences, senior researcher of military institute (research), olemmm@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy of Mozhaisky,

Hechikov Dmitry Mikhailovich, doctor of technical sciences, deputy chief designer, dmitryspbru@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, JSC «Scientific and engineering center of St. Petersburg electrotechnical university»

УДК 004.94
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-656-657

КОНЦЕПЦИЯ СОВРЕМЕННОГО КУРСА ПО ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ОСНОВАМ КОМПЬЮТЕРНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.О. Щирый

Обсуждаются проблемные вопросы создания курса по теоретическим основам имитационного моделирования, в т.ч. отсутствие единой терминологии. Предложено примерное содержание курса, включающее наряду с каноническими темами такими как метод Монте-Карло и системы массового обслуживания, также новейшие подходы такие как мультиагентное моделирование; рассмотрены также основные современные стандарты в имитационном моделировании; обсуждается совместное использования имитационного моделирования и машинного обучения.

Ключевые слова: имитационное моделирование, метод Монте-Карло, дискретно-событийное моделирование, мультиагентное моделирование, стандарты в моделировании, курс имитационного моделирования.

1. Введение. В процессе разработки и проектирования сложных технических систем неизменно возникают вопросы выбора принципов и порядка организации взаимодействия составных частей системы. Сложность самой развиваемой системы, большая вариативность и неопределенность окружающей обстановки приводят к невозможности произвести аналитическое сравнение всех возможных вариантов архитектуры системы в целом по всем ее параметрам и сделать ее однозначный рациональный выбор. Традиционным выходом в такой ситуации было проведение множества натурных испытаний. Однако дороговизна подобных испытаний, и тем более невозможность проведения натурных испытаний в ряде случаев, заставляют искать другие решения. Наиболее приспособленными для оценки эффективности сложных систем без проведения натурных испытаний являются модели имитационного типа. Имитационное моделирование используется как универсальный метод для обоснования решений в условиях неопределенности и для учета трудноформализуемых факторов. Имитационное моделирование также находит широчайшее применение в экономике, логистике, строительстве, энергетике [1,2], агропромышленном комплексе [3], моделировании боевых действий и систем вооружений и военной техники [1,4-12], в научных исследованиях [13] и др.

Поэтому существует необходимость подготовки специалистов с соответствующими компетенциями. Курсы имитационного моделирования – в том или ином виде – конечно существуют, но в большинстве случаев всё сводится к использованию готовой моделирующей системы (например, AnyLogic) на основе кейсов (примеров) какой-то предметной области. Теоретические же основы построения систем имитационного моделирования, как правило, затронуты мало или не затронуты.

2. Проблемы терминологии. Во вводной части курса необходима попытка систематизации терминологии. В литературе по имитационному моделированию нет единой классификации методов и подходов имитационного моделирования, наблюдается несогласованность в терминологии, и вообще говоря под имитационным моделированием в разных работах могут пониматься совершенно разные подходы. Например, мультиагентный подход зачастую рассматривается вообще без упоминания имитационного моделирования, а в рамках концепции агентно-ориентированного программирования. В других классификациях мультиагентный и дискретно-событийная схемы входят в качестве разных классов. Особняком могут стоять проблемы распределенных моделирующих систем. При том что мультиагентные системы (определяемые общо – как автономные интеллектуальные сущности) зачастую реализуются на основе дискретно-событийной схемы (хотя это зависит от степени автономности агентов) и являются распределенными.

В некоторых классификациях, противопоставляющих мультиагентную и дискретно-событийные схемы, дается критерий такого противопоставления: мультиагентной называется система, не имеющая механизма синхронизации модельного времени. Такие классификации не содержат указанного выше внутреннего противоречия, однако сразу возникает вопрос о целесообразности реализации мультиагентной системы, не гарантирующей своевременную доставку агентам данных о состоянии других агентов (любая попытка реализации гарантированной доставки приведет, пусть в неявном виде, к реализации дискретно-событийной схемы).

Нужно упомянуть про пошаговую схему дискретного моделирования, которую можно рассматривать как простейший случай дискретно-событийной схемы: «шаги» моделей по времени фиксированной заранее заданной величины и не зависят от текущего состояния моделей.

Не говоря уже о том, что традиционно, в более широком смысле, под имитационным моделированием понимают многократные прогоны и «разыгрывание» модели при различных реализациях случайных параметров (либо случайности внутри самой модели), метод Монте-Карло. Не претендуя на создание новой классификации, для целей данной работы можно ввести понятия имитационного моделирования «в широком смысле» (многократные

прогоны и разыгрывание модели при различных реализациях случайных параметров, метод Монте-Карло) и «в узком смысле» (есть управление модельным временем, «внутренние часы», мультиагентность). При этом названные типы имитационного моделирования не являются взаимоисключающими и несовместимыми – их можно (иногда даже нужно) совмещать, правда на разных уровнях абстракции: система имитационного моделирования «в узком смысле» может быть использована для многократных прогонов, либо с различными реализациями набора входных случайных параметров, либо «разыгрывая» внутреннюю стохастичность своих моделей (либо и то, и другое вместе) – то есть моделирования «в широком смысле».

Также следует упомянуть модели системной динамики, выделяемые как отдельный класс имитационных моделей, а также кусочно-линейные агрегаты как условный симбиоз системной динамики на основе дифференциальных уравнений и дискретных систем со скачкообразными переходами состояний.

Структура курса. Идейно в основу содержания курса может быть положена классическая работа Шеннона [1], с рядом изменений и дополнений. Наиболее существенные изменения требуются в технологической части содержания (языки программирования, среды, стандарты), необходимы дополнения сведениями по концепциям и алгоритмам распределенного имитационного моделирования, а именно: консервативный подход синхронизации модельного времени (также понятие lookahead) и оптимистический подход (понятие rollback, антисообщения, и др.), и их гибриды [13-15]. Также необходимы дополнения в части обработки и анализа результатов моделирования.

Видится большой потенциал в совместном использовании методов машинного обучения и имитационного моделирования. Это может быть и схема "имитационное моделирование для машинного обучения": для генерации синтетических обучающих выборок (когда реальные данные получить сложно, дорого, либо невозможно), для имитации среды "окружающей" машинно-обученную статистическую модель (в том числе для оценки качества обучения модели), для имитации среды "окружающей" модель при обучении с подкреплением. Это может быть, наоборот, и схема "машинное обучение для имитационного моделирования" – машинно-обученные статистические модели как часть системы имитационного моделирования (интеллектуальные агенты). Возможна и некая гибридная комплексная модель.

В целом, содержание курса видится состоящим из следующих разделов.

1. Введение. Метод разработки системотехнических решений при помощи моделей; классификация видов моделирования и математических моделей; аналитические и статистические методы моделирования сложных технических систем (СТС); имитация, как инструмент исследования СТС. Сущность метода имитационного моделирования. Виды имитационного моделирования, терминология принятая в курсе.

2. Метод Монте-Карло.

3. Некоторые типы систем массового обслуживания (СМО).

4. Системная динамика.

5. Понятие о модельном времени; общая технологическая схема имитационного моделирования; дискретная пошаговая схема, дискретно-событийная схема; консервативный и оптимистический алгоритмы управления модельным временем в распределенных системах; построение имитационных моделей. Мультиагентные системы.

6. Планирование машинных экспериментов. Обработка и анализ результатов моделирования (возможные показатели, оцениваемые с помощью имитационной модели; планирование вычислительных экспериментов; получение, анализ и интерпретация результатов вычислительных экспериментов; способы понижения погрешностей выборочных оценок расчетных параметров, в т.ч. методы снижения дисперсии).

7. Стандарты в области построения систем имитационного моделирования: стандарт архитектуры для моделирования и имитации – Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) [16,9], стандарты Фонда интеллектуальных физических агентов – Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) [17].

8. Совместное использования имитационного моделирования и машинного обучения.

Кроме того, возможно включение практических занятий с решением задач (по СМО и методу Монте-Карло). Данная работа посвящена курсу теоретических основ имитационного моделирования, для практического же курса (который требует отдельного обсуждения) лабораторные работы возможно построить на изучении готовой среды имитационного моделирования (например, AnyLogic) для не-программистских направлений подготовки (на примерах кейсов соответствующей предметной области), или на программной реализации методов и систем имитационного моделирования (в т.ч. по стандартам HLA и FIPA) для программистских направлений подготовки. В зависимости от уровня базовой математической подготовки слушателей, может быть актуальным повторение основ матстатистики (а некоторые узкие, но важные вопросы необходимо, скорее всего, дать впервые, вроде получения случайной величины нужного закона распределения из равномерно распределенной случайной величины).

Заключение. Также хотелось бы отметить, что курс может быть дополнен рассмотрением таких вопросов как алгоритмы генераторов случайных чисел, оценки их качества, проблемы генераторов случайных чисел в распределенных и распараллеленных системах; технологические аналогии мультиагентного подхода и микросервисной архитектуры; совместного использования имитационного моделирования и алгоритмов теории обучения машин; и др.

Список литературы

1.Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука: Пер. с англ. / Под ред. Е.К. Масловского. М.: Мир, 1978. 418 с.

2.Имитационное моделирование: учебное пособие / сост. Д.В. Арясова, М.А. Аханова, С.В. Овчинникова. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. 186 с.

3.Худякова Е.В., Липатов А.А. Имитационное моделирование процессов и систем в АПК: учебник. М.: ИКЦ «Колос-с», 2021. 256 с.

4.Имитационное моделирование боевых действий: теория и практика / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Созинова П.А., д-ра техн. наук, проф. Глушкова И.Н. Тверь, 2013. 528 с.

5.Плаксенко О.А., Щирый А.О. Имитационная модель командного пункта системы предупреждения о ракетном нападении в составе системы моделирования боевых действий // Труды восьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017). СПб, 2017. С. 507-512.

6.Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Функции имитации боевых действий в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №3. С. 30-34.

7.Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Реализация имитационного моделирования в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2018, № 21.С. 290-293.

8.Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирый А.О. Обоснование облика перспективных радиолокационных станций посредством разрабатываемой отечественной системы автоматизированного проектирования // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2019, Т.11, №1. С. 4-11.

9.Коновальчик А.П., Щирый А.О. Имитационное моделирование РЛС в разрабатываемой САПР РЛС и перспективы его перевода на технологию HLA IEEE-1516 // Информационные системы и технологии. 2022. №5 (133). С. 27-34.

10. Щирый А.О. Совмещение событийной и пошаговой схем дискретного имитационного моделирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022, Вып.12. С. 338-342.

11. Коновальчик А.П., Щирый А.О. Универсальная программная платформа для имитационного моделирования боевых действий // Вопросы радиоэлектроники. 2019. №3. С.22-26.

12. Щирый А.О. Комплексное имитационное моделирование для отладки и проведения испытаний адаптации загоризонтных радиолокационных станций декаметрового диапазона к геофизическим условиям // Труды Десятой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). СПб, 2021. С. 520-527.

13. Бродский Ю.И. Распределенное имитационное моделирование сложных систем. М.: ВЦ им. А.А. Дорницына РАН, 2010. 156 с.

14. David R. Jefferson, Peter D. Barnes Jr. Virtual time III: Unification of conservative and optimistic synchronization in parallel discrete event simulation // In Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. P.786-797.

15. Richard M. Fujimoto, Rajive L. Bagrodia, Randal E. Bryant, K. Mani Chandy, David R. Jefferson, Jayadev Misra, David M. Nicol, Brian W. Unger. Parallel discrete event simulation: The making of a field // In Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. P. 262-291.

16. IEEE 1516-2010 Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA). Electronic resource URL: https://standards.ieee.org/standard/1516-2010.html (дата обращения: 10.05.2023).

17. FIPA Abstract Architecture Specification. [Electronic resource] URL: http://www.fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.pdf (дата обращения: 10.05.2023).

Щирый Андрей Олегович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, andreyschiriy@gmail.com, Россия, Москва, АО «НПК «НИИДАР»

THE CONCEPT OF A MODERN COURSE ON THE THEORETICAL FOUNDATIONS OF COMPUTER SIMULATION

A.O. Schiriy

The problematic issues of creating a course on the theoretical foundations of simulation modeling, including the lack of a unified terminology, are discussed. The approximate content of the course is proposed, which includes, along with canonical topics such as the Monte Carlo method and queuing systems, as well as the latest approaches such as multi-agent modeling; the main modern standards in simulation modeling are also considered; the joint use of simulation modeling and machine learning is discussed.

Key words: simulation, modeling, Monte Carlo method, discrete-event modeling, multi-agent modeling, standards in modeling, simulation modeling course.

Schiriy Andrey Olegovich, candidate of technical sciences, senior researcher, andreyschiriy@gmail.com, Russia, Moscow, JSC «NPC «NIIDAR»