

УДК 303.094.7

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СРЕД МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ю.Б. Колесов (Москва), Ю.Б. Сениченков (Санкт-Петербург)

Введение

При проектировании устройств с помощью компьютерных моделей обычно используются математические (уравнения) и/или имитационные (правила, имитирующие наблюдаемое или желаемое поведение) модели. Учитывая сложность современных устройств, в одной модели приходится одновременно использовать «управленческие» (компоненты с входами-выходами), «физические» (компоненты с контактами потоками) и агентные (независимые компоненты с активным поведением, обменивающиеся между собой данными с помощью сообщений) подходы. Модели могут иметь переменную структуру и чаще всего оказываются событийно-управляемыми. Проектирование подразумевает сравнение поведения различных вариантов в различных режимах, что, по сути, является вычислительным экспериментом.

Для моделирования сложных систем используются отечественные специализированные (SimInTech, пакет МВТУ, ИСМА, Actor Pilgrim, Stratum) и универсальные (AnyLogic – разрабатывался в России, AnyDynamics) среды моделирования. Востребованы модели на различных алгоритмических языках (С, С++, Python), автоматически переведенные пакетом с языка моделирования среды.

Универсальные среды моделирования (Matlab-Simulink, OpenModelica, System Modeler, MapleSim, Anydynamics) включают Редактор моделей, Визуализатор поведения, библиотеки численных методов, программное обеспечение для проведения вычислительного эксперимента и компьютерную графику. Для управления вычислительным экспериментом используются различные варианты машины состояний.

В этой статье мы обсудим возможности среды AnyDynamics и необходимые организационные мероприятия (обучение, сопровождение, разработка специализированных версий) для использования ее в качестве основного средства моделирования сложных динамических систем отечественными предприятиями.

История создания среды

Первые версии среды были созданы в середине девяностых коллективом (Д.Б. Инихов, М.А. Инихова, Ю.Б. Колесов), руководимым Ю.Б. Колесовым [1]. В конце девяностых к разработке среды присоединились сотрудники кафедры РВКС (распределенные вычисления и компьютерные сети) Санкт-Петербургского политехнического университета [2,4,5]. Среда получила название MvStudium (Model Vision Studium) и позиционировалась как графическая среда для моделирования гибридных систем [3].

В 2007 году среды (версия 4.1.9) была куплена компанией Transas Technologies и использовалась для разработки морских тренажеров [6]. Результатом сотрудничества стала версия под названием Rand Model Designer (<http://simulation.su/static/mv-studium-full-info.html>). В 2015 году журнал PC Magazine (<https://www.pcmag.com/>) назвал среду лучшей среди отечественного программного обеспечения [7]. К разработчикам присоединился выпускник кафедры РВКС А. Исаков [8]. В 2018 году по заказу компании Пентакон (<https://www.cctv.ru/>) была создана среда АКИМ, в разработке которой принимал участие аспирант кафедры РВКС И.К. Шарков [9].

Первые книги о среде были опубликованы в начале двухтысячных [10,11]. Научные результаты, связанные со средой, легли в основу двух докторских диссертаций [12,13].

Учебники и учебные пособия публикуются постоянно [16-19, 26, 28-30].

Среда постоянно модифицировалась, расширяя круг моделируемых систем, и в 2024 году стала называться AnyDynamics [14] (<https://www.mvstudium.com/>). Базовая версия AnyDynamics является бесплатной программой и позволяет проводить визуальные интерактивные вычислительные эксперименты, а также создавать модели, встраиваемые в приложение пользователя. Объектно-ориентированный доступ к встраиваемым моделям поддерживается для сред программирования Delphi, C#, Python.

Модели на базе уравнений

Динамические и событийно-управляемые системы обычно представляются алгебраическими, дифференциальными и алгебро-дифференциальными уравнениями. Для их решения в среде AnyDynamics используются оригинальные и модифицированные программные реализации численных методов из пакетов BLAS, LINPACK, SPARSPAK, ODEPAK.

Модели на базе уравнений возникают, например, при решении задач внешней баллистики [15]. Модель трехступенчатой межконтинентальной ракеты входит в набор демонстрационных моделей (проект «БРДД»). В модели используются довольно сложные матричные уравнения движения, модель Земли в виде эллипсоида и многослойная модель атмосферы

Карта поведения модели отражает основные этапы полета: выход из контейнера, активный участок (ступени 1,2,3), внеатмосферный полет, вход в атмосферу головной части (рисунок 1). На каждом этапе движение задается своим набором уравнений и набором параметров. Система моделирования осуществляет переключение между наборами уравнений и согласование начальных условий автоматически.

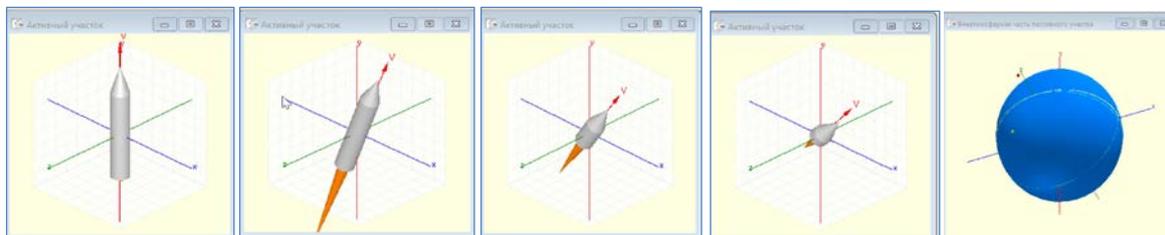


Рис.1 – Этапы движения трехступенчатой ракеты

Еще одним примером модели на базе уравнений может служить модель управляемой зенитной ракеты. В этой модели требуется найти силы, воздействующие на ракету при заданном методе наведения. Необходимо выполнить символьное дифференцирование некоторых исходных уравнений, без чего этот набор уравнений численно решить невозможно. AnyDynamics выполняет символьное дифференцирование автоматически.

Классическим примером «физического моделирования» являются модели для морских тренажеров Transas Technologies, в которых решаются системы из тысяч алгебро-дифференциальных уравнений. Эти наборы уравнений автоматически получаются системой моделирования из многоуровневой структурной схемы моделируемой системы, анализируются и приводятся к форме, пригодной для численного решения.

Имитационные модели

Имитационные модели являются одной из форм статистического моделирования. Это легко пояснить с помощью Марковских цепей, требующих построения матрицы переходов и решения уравнений Колмогорова.

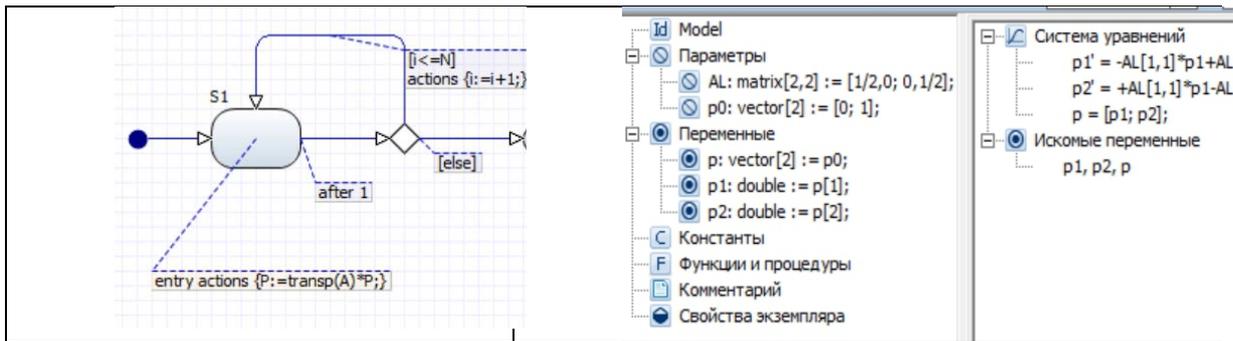


Рис. 2 – Модели Марковской цепи в виде машины состояний и системы уравнений

Машины состояний и уравнения позволяют легко описать процесс нахождения искомых вероятностей (P) для дискретного (слева) и непрерывного случая (справа) (Рис.2).

Однако нужные вероятности можно найти и с помощью статистического эксперимента. Представим Марковскую цепь в виде машины состояний с вероятностными переходами, соответствующими вероятностям в матрице переходов (рисунок 3). При входе в новое состояние генерируется случайное число от нуля до единицы, конкретная реализация случайного процесса, определяющая переход в следующее состояние. Повторяя многократно эксперименты (N – число экспериментов), можно оценить искомые вероятности с нужной точностью.

Опираясь на рассмотренную схему, будем строить машины и проводить статистические эксперименты с интересующими нас моделями. Машину состояний можно построить, опираясь на локальные правила выбора очередного перехода, определяющие локальное поведение исследуемого объекта. Схема статистического эксперимента остается прежней. Таким образом, мы получаем возможность моделировать и немарковские процессы, главное заключается в доступности машин состояний (в некоторых случаях используют сети Петри) в используемой среде моделирования (StateFlow – Simulink, State Machines – OpenModelica, AnyLogic, AnyDynamics).

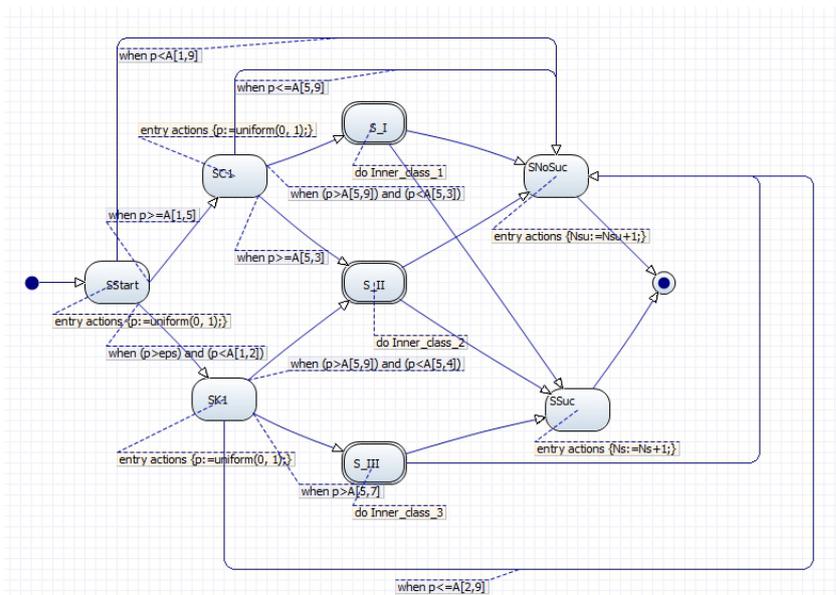


Рис. 3 – Модель автомата Маркова

Помимо проведения статистического эксперимента среда AnyDynamics легко справляется и с задачами массового обслуживания и агентными моделями, так как поддерживает динамическое создание и уничтожение объектов и связей между ними.

Специализированные версии

На основе базовой версии AnyDynamics для конкретных заказчиков возможно:

- создание специализированных версий среды моделирования;
- разработка библиотек классов для конкретной прикладной области;
- разработка конкретных моделей со специальной визуализацией;
- встраивание моделей в приложения пользователей.

Тестирование и сравнительный анализ

В итоге, пользователю все равно, какую среду использовать, лишь бы результаты моделирования были востребованы, а затраты разумными.

Гарантией правильности построенной модели может быть совпадение результатов моделирования в различных средах на тестовом наборе, включающем все возможные типы моделей (однокомпонентные непрерывные и дискретные, событийно-управляемые, многокомпонентные с различными типами блоков, переменной структуры, агентные). Такой тестовый набор нужен и для проверки работоспособности новых версий среды, так как активно используемая среда модифицируется непрерывно. Не менее важно проверять и корректность работы программных реализаций численных методов, и алгоритмов, формирующих и преобразующих итоговые уравнения. К сожалению, таких общедоступных наборов пока нет, но мы приступили к его созданию (тема кандидатской диссертации аспирантки Ван Шань), и уже используем его для сравнительного анализа работы AnyDynamics и OpenModelica.

Сравнительный анализ сред – чрезвычайно важная задача, как для разработчиков, так и для пользователей. В нашей стране эта работа началась [21-25], но до ее завершения еще далеко (возможная тема для диссертации).

Учебные курсы

Полный цикл обучения компьютерному моделированию с использованием сред AnyDynamics и OpenModelica на кафедре РВКС предусматривал изучение нескольких дисциплин:

- Бакалавры, 1 курс. Основы профессиональной деятельности на примере компьютерного моделирования (осень: лекций – 4, лаборатории – 12); 4 курс: Математическое моделирование (осень: лекций – 19, лаборатории – 16); Компьютерное моделирование (весна: лекций – 13, лаборатории – 13);
- Магистры, 1 курс. Основы объектно-ориентированного моделирования (осень: лекций – 13, лаборатории – 13).
- Аспиранты. Возможные темы: сравнительный анализ и тестирование сред; конвертирование моделей; формирование и преобразование уравнений; автоматический выбор методов для решения уравнений, основанный на априорном и апостериорном анализе свойств решаемой системы.

Основы профессиональной деятельности на примере моделирования. Лекции.

Введение в моделирование. Жизненный цикл создания компьютерной модели. Среда моделирования. Разработка модели в среде Anydynamics. **Лаборатории.** Математическое описание модели и требования к будущей компьютерной модели (школьные задачи по механике). Редактор уравнений. Машина состояний. Визуализатор поведения. 2D и 3D – графика. Отладчик. Создание визуального образа объекта моделирования (3D-анимация). Проверка правильности работы созданной модели. Вычислительный эксперимент в AnyDynamics. Отчет и презентация. Тест. Зачет.

Математическое моделирование. Лекции. Математическое моделирование. Модели. Математическое моделирование. Вычислительный эксперимент. Динамические системы. Динамические системы на прямой. Динамические системы на плоскости. Событийно-управляемые динамические системы. Событийно-управляемые

динамические системы. Эффект Зенона. Области прошивания, скольжение, псевдо-особые точки. Устойчивость. Свойства динамических систем. Свойства событийно-управляемых динамических систем. Введение в теорию колебаний. Бифуркации. Марковские процессы. Вычислительный эксперимент в AnyDynamics. Программное обеспечение моделирования ДС и вычислительного эксперимента. Тест. Зачет. Экзамен. **Лаборатории.** Динамические системы на прямой. Динамические системы на плоскости. Устойчивость. Событийно-управляемые системы. Бифуркации. Цепи Маркова.

Компьютерное моделирование. Лекции. Компоненты. Декомпозиция и агрегация сложной модели. ООМ в AnyDynamics. Классы, объекты, структура, пакеты. Итоговые системы уравнений. Блоки с входами-выходами (I/O). Блоки I/O SIMULINK. Блоки с контактами потоками (C/F). Блоки C/F MODELICA. Событийно-управляемые системы (AnyDynamics, Simulink-StateFlow, Modelica). Уравнения и численные библиотеки сред визуального моделирования. Агентное моделирование. Имитационное моделирование. Схемы переменной структуры. Сравнительный анализ сред визуального моделирования. Тест. Зачет. Экзамен. **Лаборатории.** ОММ. Многокомпонентная модель. Блоки с входами-выходами. Блоки Simulink. Блоки с контактами-потоками. Модели переменной структуры. Системы массового обслуживания.

Среды компьютерного моделирования. Лекции. Среды компьютерного моделирования. Основные этапы построения модели. Языки моделирования. Типы решаемых уравнений и численные методы для них. UML. Структура. Классы. Объекты. UML. Машины состояний. Simulink. OpenModelica. Ptolemy II. Назначение переменных. Алгоритм Холла. Приведение к блочно-диагональному виду. Алгоритм Тарьяна нахождения компонент связности в графе. Поиск точки переключения. Символьное дифференцирование. Среды на базе математических пакетов: MapleSim, System developer. Области применения сред моделирования. Примеры моделей (модели распространения инфекций). Тест. Зачет. Экзамен.

Заключение

С нашей точки зрения компьютерное моделирование в России находится на достаточно высоком уровне с точки зрения разработки сред, но есть проблемы с их применением на практике. Заслуженный успех среды Simulink привлек внимание к ней отечественных пользователей. Это привело к тому, что наши пользователи практически не обращают внимание на среды на основе языка Modelica (<https://modelica.org/>), достаточно широко используемые в Европе, не говоря уже об отечественных средах. Это и понятно: лучшее враг хорошего.

В сложившейся международной обстановке требуется государственная поддержка для разработки и пропаганды отечественных сред.

Государственная помощь может быть грантом для:

- проведения конференции с приглашением разработчиков сред и потенциальных пользователей из университетов, научных организаций и промышленности (пропаганда отечественных сред);
- организации лаборатории на базе Санкт-Петербургского политехнического университета для обучения пользователей и, главное, для реализации проектов, в которых заказчиками выступают будущие работодатели, а исполнителями – студенты, аспиранты и молодые сотрудники университета (обучение преподавателей и пользователей и целевое трудоустройство студентов).

Деньги для этого нужны относительно небольшие, особенно на стипендии исполнителям проектов, но это будет реальный шаг на пути импортозамещения зарубежного программного обеспечения.

Нужно заметить, что все необходимое для обучения современным методам компьютерного моделирования уже есть: сайты с выложенными на них лекциями, методическими указаниями, индивидуальными заданиями, что позволяет вести обучение дистанционно; учебники [26-30].

В свою очередь, наш коллектив готов сотрудничать с государственными и коммерческими организациями в области разработки программного обеспечения для моделирования, создания специализированных сред, обучения потенциальных пользователей, и, самое трудноосуществимое, создания условий, когда отечественное программное обеспечение станут покупать, а не воровать зарубежное.

Литература

1. **Инихов Д.Б., Инихова М.А., Колесов Ю.Б.** Model Vision Studium, Руководство пользователя. НИЦПРИС. «МВСофт», 1993-94.
2. Библиотека программ для решения ОДУ. Труды ЛПИ, 462. (Numerical library for solving ODE. /Yu. B. Kolesov, Yu. B. Senichenkov, in Scholarly Work of STU, 462, 1996, p. 116-122).
3. Hybrid systems and numerical solution of ODE. /Yu. Kolesov, Yu. Senichenkov. Differential equations and applications. The first international conference. St. Petersburg, 1996, pp.105-107.
4. **Kolesov Yu., Senichenkov Yu.** Model Vision 3.0 for Windows 95/NT. The graphical environment for complex dynamic system design. In: ICI&C'97. International conference on Informatics and Control. St. Petersburg, pp. 764-768 (1997).
5. **Kolesov Yu., Senichenkov Yu.** Visual Specification language intended for event-driven hierarchical dynamical systems with variable structure. In: ICI&C'97. International conference on Informatics and Control. St. Petersburg, pp. 704-711 (1997).
6. **Tarasov S.** Application Experience of Component Modeling in Transas Group's Training System Development for Cargo-Ballast and Technological Operations. Automation and Remote Control, 77(6), pp. 1106-1114. (2016). 16.
7. Russian software 2015: innovations and advancement. PC Magazine: Russian Edition. 5259, 11 (2015).
8. **Isakov A., Senichenkov Yu.** Rand Model Designer' numerical library. In: Linköping Electronic Conference Proceedings 142:140, s. 953-958 (2016).
9. **Шарков И.К., Крылов В.М., Колесов Ю.Б.** Planning and quality evaluation of physical protection systems using simulation modeling. Computer tools in education, 2022, № 2: 32-40.
10. **Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.** Практическое моделирование динамических систем. СПб.: БХВ-Петербург, 2001. –441с.
11. **Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.** Визуальное моделирование сложных динамических систем. Изд. «Мир и Семья», 2001.
12. **Колесов Ю.Б.** Объектно - ориентированное моделирование сложных динамических систем. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. –239с.
13. **Сениченков Ю.Б.** Численное моделирование гибридных систем. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. –206с.
14. **Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.** AnyDynamics – новая версия среды Rand Model Designer. ИММОД 2021, Сборник докладов.
15. **Беневольский С.В., Колесов Ю.Б.** Объектно-ориентированное моделирование в задачах внешней баллистики. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. –127с.
16. **Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.** Моделирование систем. Практикум по компьютерному моделированию(CD-ROM). СПб.: БХВ-Петербург, 2006. - 352с.

17. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. –224с.
18. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. –192с.
19. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование в среде Rand Model Designer 7: учебно-практическое пособие / Москва : Издательство «Проспект», 2016. –256 с. ISBN 978-5-392-22360-2.
20. Сениченков Ю.Б., Шарков И.К. Разработка имитационных моделей систем физической защиты в среде «АКИМ» (принята к печати журналом «Программные продукты и системы»).
21. Сениченков Ю.Б., Рыжов В.А., Шорников Ю.В., Доставалов Д.Н. (2017). Computer modeling of complex dynamic systems. Assessment of the need for specialists. Computer Tools in Education, (3), 51-60.
22. Senichenkov Y., Kolesov Y., Urquia Al., Martin-Vilaba C. Simulation of variable structure using Rand Model Designer. 8th EUROSIM congress on modeling and simulation, 2013.
23. Kamil Md.S., Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A., Senichenkov Y.B., Novopashenny Ig. Computer simulation and modeling in engineering for open learning environment environments – a case study on application of Rand Model Designer for ship maneuvering analysis. Journal of Advanced Research in Applied Mechanics 69, Issue 1 (202), 1-6.
24. Клебанов Б.И., Вакушин А.А., Тен Ю.М. Применение пакета AnyDynamics для разработки имитационных моделей социальных сетей. Современные наукоемкие технологии, № 4, 2022, с.46-51.
25. Вакушин А.А., Клебанов Б.И. Проектирование многокомпонентных имитационных моделей с помощью БЯМ технологий. Инженерный вестник Дона. № 7(2024).
26. Маликов Р.Ф. Компьютерное моделирование динамических систем в среде rand model designer: учебное пособие для вузов / Р. Ф. Маликов. — Электрон. дан. — Москва: Юрайт, 2023. –223 с. (Высшее образование).
27. Сениченков Ю.Б. Компонентное моделирование сложных динамических систем: сборник заданий. ISBN 978-5-7422-6328-9. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. –122 с.
28. Сениченков Ю.Б., Ампилова Н.Б., Тимофеев Е.Л. Математическое моделирование сложных динамических систем: сборник заданий. ISBN 978-5-7422-5960-2. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. –108 с.
29. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Компонентное моделирование сложных динамических систем: учебное пособие. ISBN 978-5-7422-6685-2 СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019.
30. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Математическое моделирование сложных динамических систем: учебное пособие. ISBN 978-5-7422-6684-3. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019.