

# Специфика прикладных средств агентно-ориентированного моделирования

А. Ю. Климовская

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет), Financial University  
klimovskaya@mail.ru

**Аннотация.** Имитационное моделирование представляет из себя одно из наиболее мощных средств исследования, в частности, для сложных динамических систем. Как и любое компьютерное моделирование, такой вид моделирования дает возможность проводить вычислительные эксперименты системами, которые только еще подлежат созданию и изучать системы, натурные эксперименты с которыми, из-за соображений безопасности или дороговизны, не целесообразны. В то же время, благодаря своей близости по форме к физическому моделированию, это метод исследования доступен более широкому кругу пользователей.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование; агентно-ориентированное моделирование; структура модели; развитие; синтез технологий

## I. ВВЕДЕНИЕ

Моделирование называется методом решения задач, в процессе которого анализируемая система должна быть заменена объектом, выступающим в качестве более простого, который, в свою очередь, является описывающим реальную модель и называется моделью.

Имитационной моделью называется компьютерная программа, которая описывает конструкцию и воссоздает поведение реальной системы на протяжении определенного временного промежутка. Данная модель позволяет получить детальную подробную статистическую информацию о различных сторонах работы системы, что обуславливается различными входными данными.

Таким образом, целью данного исследования является изучение специфики средств визуализации имитационного моделирования.

Имитационное моделирование выступает методом, который позволяет строить модели, описывающие процессы именно такими, какими они будут выступать в реальности. На основании имитационного моделирования могут быть построены гипотезы и прогнозы, на основании которых могут быть предсказаны будущие особенности поведения системы. Имитационное моделирование применяется к процессам, в которых участвует человек. Сотрудник, руководящий операцией, может в зависимости от сложившейся обстановки, принимать те или иные решения. Затем приводится в действие математическая модель, которая показывает, какое ожидается изменение обстановки в ответ на это решение, и к каким

последствиям оно приведет спустя некоторое время. Следующее решение принимается уже с учетом новой обстановки и так далее. В результате многократного повторения такой процедуры руководитель набирает опыт, и учится принимать правильные решения.

Задачи, которые решаются с помощью имитационного моделирования, могут быть разделены на 4 вида: прямые задачи анализа, при решении которых исследуемая система задаётся параметрами своих элементов и параметрами исходного режима, после чего требуется определить реакцию системы на действующие силы; обратные задачи анализа, которые по известной реакции системы требуют найти возмущения, заставившие рассматриваемую систему прийти к данному состоянию и данной реакции; задачи синтеза, требующие нахождения таких параметров, при которых процессы в системе будут иметь желаемый характер; индуктивные задачи, целью которых является проверка гипотез, уточнение уравнений, описывающих процессы, происходящие в системе, выявление свойств этих элементов, настройка программ для расчётов на компьютере.

## II. ОБЗОР СРЕДСТВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

AnyLogic- это ПО для имитационного моделирования. Оно позволяет симулировать модели, построенные с использованием трех различных подходов: системная динамика, дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование и их комбинации. Среда обладает современным графическим интерфейсом, который позволяет создавать интерактивную анимацию для наглядности модели и интеграцию с геоинформационными системами, базами данных и пользовательскими библиотеками. Разработанные модели можно экспортировать в приложения на языке Java. AnyLogic использует модульную объектно-ориентированную парадигму. Помимо задания различных последовательностей взаимодействий элементов модели, в среде также можно использовать стохастические процессы для моделирования случайных событий.

Тем не менее, система предназначена в основном для моделирования бизнес-процессов, логистики и производства, включая стратегические модели развития рынков и компаний, физические законы в этой среде напрямую не поддерживаются, и их необходимо самостоятельно реализовывать. Также стоит отметить, что

ПО является платным, хотя есть и бесплатные версии, доступные при соблюдении определенных ограничений.

Simplex3. Система имитационного моделирования Simplex3 позволяет строить дискретные модели и обладает собственным встроенным языком описания эксперимента Simplex-EDL. Simplex3 – среда разработки имитационного моделирования с собственным языком описания модели, разработанная в университетах Нюрнберг-Эрланген и Пассау (Германия), которая развивалась в течение нескольких итераций, включая предшественника Simplex2. Она позволяет строить системно-динамические и дискретно-событийные модели и расширять их с помощью языка C, но полноценной поддержки агентного моделирования в системе нет. Код системы закрытый, с намерением разработчика коммерциализировать проект, однако пока что, судя по сайту, проект требует лицензии и не предоставляет очевидного способа (кроме прямого запроса автору) получить (скачать) систему или приобрести лицензию. Поддержка продукта в виде документации и примеров весьма ограниченная, особенно на английском языке (основные работы на немецком языке).

Repast – имеет встроенный расширяемый графический интерфейс, экспорт данных, реализует интерфейсы, позволяющие работать с рядом внешних программ, обрабатывающих и визуализирующих данные (RStudio, обработчики таблиц наподобие Excel, WEKA Data Mining Software и некоторые другие), генерирует переносимый stand-alone-код на Java, во многих случаях скрывает проблемы параллельности и синхронизации и решает их за пользователя, имеет версию для использования на вычислительных кластерах (Repast for High Performance Computing [3]). Графический интерфейс среды может настраиваться пользователем. Иллюстративный пример, показывающий одновременно визуализацию модели и вывод собираемых данных, приведен на рис. 3.

Однако, несмотря на возможность удобным образом редактировать определенные элементы интерфейса, выводить графики и выбирать экспортируемые данные, в нем непросто менять интерфейс произвольным образом, добавлять нестандартное взаимодействие с элементами симуляции и дополнительные пользовательские окна, и элементы интерфейса.

В Repast нет стандартизованного и поддерживаемого библиотекой способа организации взаимодействия между агентами: для общения или иных действий агентов, объектом которых выступает другой агент, необходимо вызывать методы объекта взаимодействия или редактировать его параметры напрямую. Это вызывает необходимость следить за его состоянием, учитывая возможность параллельного действия нескольких агентов на него (то есть заниматься синхронизацией, что обычно выполняется библиотекой Repast в других случаях), а также затрудняет написание двустороннего диалога (взаимодействия) между агентами, происходящего в течение одного шага симуляции. Создание модулей или надстроек над Repast возможно (рис. 1), однако, хотя документация и есть, поддержка этого ПО несколько

ограниченная, разработка и расширение системы могут быть весьма проблематичными.

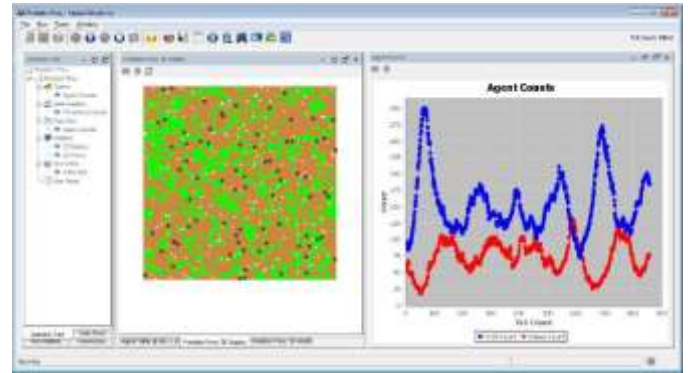


Рис. 1. Графический интерфейс Repast на примере модели «Охотник-Жертва»

Отдельно стоит упомянуть системы, предназначенные для моделирования групп роботов как наиболее приближенные к задаче построения искусственного интеллекта.

Webots. Среди имеющихся библиотек есть наиболее используемые сенсоры и исполнительные устройства: датчики света, акселерометры, камеры и некоторые другие. Основой Webots является библиотека физической симуляции ODE (Open Dynamics Engine), которая позволяет симулировать динамику твердых тел. Это дает возможность определения столкновений тел, расчета сил, моментов, учета трения и многое другое.

Основой Gazebo является физический движок, который можно при необходимости переключить перед началом симуляции. Примерами возможностей расширений являются инфракрасные дальномеры, видеочамера, сервомоторы, управляемые внешними программами, встроенный в систему моделирования контроллер и даже физические эффекты передвижения в жидкости.

Несмотря на эти многочисленные достоинства, Gazebo не очень подходит для симуляции систем с большим количеством агентов из-за достаточно большой ресурсоемкости производимой обработки, поэтому моделировать работу систем с более, чем 1 000 агентов затруднительно.

ARGoS-многопоточный симулятор, ориентирующийся на поддержку большого количества роботов в различных физических средах в рамках одной симуляции. Он поддерживает как 2D-, так и 3D-моделирование. Большое внимание в нем уделено модульности, в результате чего предоставляется возможность использовать разработанный код как в симуляции, так и на реальных роботах, выбирать между различными визуализациями и физическими движками, пользоваться ускорением вычислений за счет параллельного выполнения расчетов с несколькими типами синхронизации и даже совмещать несколько различных библиотек физической симуляции в одной модели мира. Помимо этого, ARGoS предоставляет симуляцию нескольких разных типов коммуникации между роботами: RFID-метки, WiFi и т.д.

ARGoS доступен в виде исходных кодов (под лицензией MIT), а также готовых пакетов под MacOSX и нескольких дистрибутивов GNU/Linux. Имеется некоторая поддержка Windows. Система поддерживает пользовательские расширения. Скорость симуляции может достигать 40 % ускорения по сравнению с реальным временем для 10 000 роботов. Однако, как и многие другие симуляторы, ARGoS не предоставляет особой поддержки механизмам социального взаимодействия в коллективах роботов, а его масштабируемость, судя по всему, ограничивается использованием локальных ресурсов.

Сравнительный анализ приведенных программных продуктов показывает, что они лишь частично удовлетворяют специфике моделирования многоагентных робототехнических систем и искусственных коллективов с социальной структурой, и позволяет составить более точные требования к такой среде моделирования.

### III. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА ПОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ВНУТРИПОРТОВОЙ ЛОГИСТИКИ

При проектировании нового порта или модификации существующего перед руководством и инженерами встает множество задач о выборе оптимального оборудования для выполнения различных внутрипортовых операций. С одной стороны, оборудование должно обладать техническими характеристиками и присутствовать в количестве, достаточном для обработки грузооборота порта, с другой стороны, инвестиции в оборудование и его обслуживание не должны превышать определенных границ бюджета. Подобные задачи встают для всевозможных типов оборудования порта, а именно, подъемно-транспортного оборудования, инженерных сетей, систем для обработки специальных типов грузов (накатных, наливных и др.), судов портового флота, железнодорожного оборудования и др. Традиционные методики определения необходимого количества и типов оборудования заключаются в аналитическом расчете, основанном на средних ожидаемых показателях загруженности. Однако, такой способ неточен, слишком сложен или невозможен, если проектируемая система сложна, и её поведение определяется случайными характеристиками. По сравнению с аналитическим расчетом имитационное моделирование позволяет существенно лучше учесть всю сложность и стохастичность системы, т.к. позволяет с определенной степенью точности воспроизвести поведение системы. Кроме того, модель автоматически предоставляет подтверждение рассчитываемых данных численным экспериментом, во-первых, за счёт контроля в любой момент времени за любой характеристикой системы, и, во-вторых, за счёт визуализации всех процессов.

Пример основан на проекте, выполненном компанией The AnyLogic Company (ранее ООО «Экс Джей Текнолоджис», XJ Technologies), для порта Гавра - второго по величине порта Франции и пятого в Северной Европе. Разработка велась в среде имитационного моделирования AnyLogic. Перед руководством порта стояла задача проектирования нового мультимодального терминала,

предназначенного для обработки импортного и экспортного контейнерного грузопотока, перевозимого железнодорожным и речным транспортом. Для организации взаимодействия мультимодального и уже имеющихся на территории порта двух морских терминалов планировалось использовать челночные отправки железнодорожных составов. При этом рассматривались два варианта организации перевозок на территории терминала - с использованием традиционных подвижных составов и составов, состоящих из автономных групп вагонов. Целью разработки имитационной модели являлось сравнение данных вариантов и выбор наиболее целесообразного из них с точки зрения минимизации затрат на перевозку контейнеров.

В качестве входных данных модель позволяет задавать следующие характеристики: время прибытия и требуемое время отправки каждого контейнера для мультимодального и морских терминалов с разделением на железнодорожный и речной транспорт; расписание прибытия и отбытия грузовых поездов для мультимодального терминала; график движения речных судов для мультимодального терминала; характеристики технологического оборудования (скорость движения, время обработки контейнера) для мультимодального и морских терминалов; характеристики железнодорожных составов, курсирующих между терминалами: количество доступных локомотивов; количество независимых групп вагонов; скорость движения на терминалах и между ними; др. временные операции, связанные с движением составов.

Часть входных параметров задаётся через интерфейс модели, а часть – в файле MS Excel. Способ задания определяется сложностью той или иной характеристики порта и количеством данных: расписание прибытий и отправок судов и поездов удобнее задавать в файле MS Excel, а технологические характеристики оборудования – с помощью интерфейса модели (рис. 2 и 3).



Рис. 2. Имитация модели

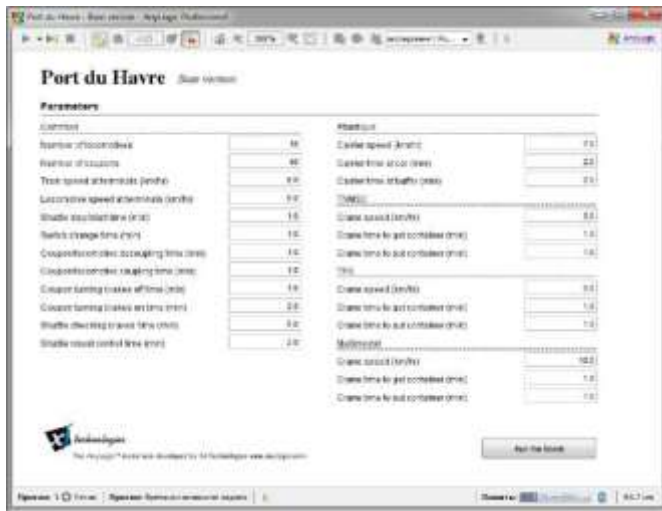


Рис. 3. Задание входных параметров через интерфейс модели

Во время выполнения имитационного эксперимента выполняется динамическая регистрация наполненности зон хранения контейнеров на терминалах, показателей качества обслуживания контейнеров (время нахождения на терминале, время перегрузки), коэффициентов использования технологического оборудования и подвижного состава; производится динамический расчет затрат на функционирование терминалов и подвижного состава по отдельным статьям и суммарно. Пользователю предоставляется возможность визуального контроля над процессом за счёт отображения информации о статусе каждого контейнера, технологического оборудования и подвижного состава. После окончания эксперимента результаты моделирования записываются в файл MS Excel для дальнейшего сравнения с результатами эксперимента при других входных параметрах.

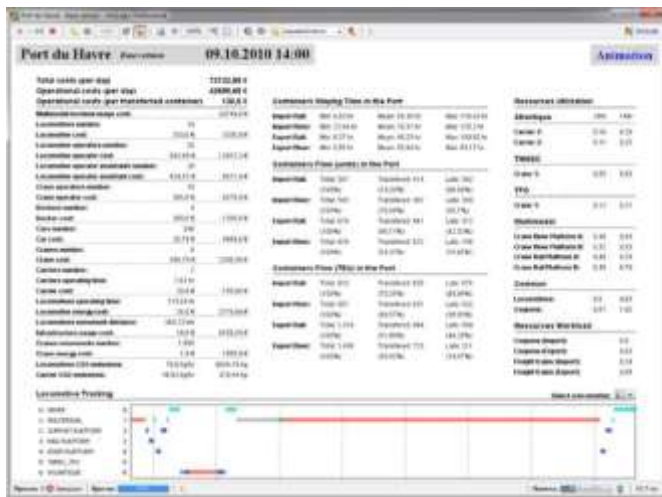


Рис. 4. Отображаемая статистика

Следует отметить, что данный пример является лишь частным случаем применения имитационного моделирования. Данная технология подходит для широкого

спектра задач и в настоящее время становится всё более распространённой в различных отраслях, включая многие задачи, возникающие при проектировании портов.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Областями деятельности, в которых широкое распространение получает использование имитационного моделирования в процессе проведения исследований, являются: бизнес-процессы, динамика населения, экосистемы, сервисные центры, ИТ-инфраструктура, производство, математическое моделирование в построении исторических процессов, логистика, рынок и конкуренция, цепочки поставок, управление проектами.

Автоматизация имитационного моделирования на сегодняшний день широко распространена в следующих сферах деятельности: процессы моделирования для определения временных и стоимостных параметров; управление процессами реализации инвестиционного проекта, на различных этапах его жизненного цикла с учётом возможных рисков и тактики выделения денежных средств; прогнозирование финансового результата деятельности предприятия на конкретный период времени; изменение структуры и ресурсов предприятий, после которого, с помощью имитационной модели может быть сделан прогноз основных финансовых результатов и даны рекомендации о целесообразности данной деятельности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бондаревский А.С., Лебедев А.В. Имитационное моделирование: определение, применимость и техническая реализация // Фундаментальные исследования. 2011. № 12-3. С. 535-541.
- [2] Воробьев В.В. Алгоритм кластеризации коллектива роботов // Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта: сб. тр. III Всерос. науч.-практ. сем. Иннополис, 2015. С. 50-59.
- [3] Звягин Л.С. Технология управления и исследования моделей сложных инновационных систем предприятий средствами имитационного моделирования // Экономика и управление: проблемы, решения. 2019. Т. 2. № 1. С. 95-105.
- [4] Звягин Л.С. Имитационное и агентно-ориентированного моделирования при решении задач пространственного развития экономики // «Стратегические задачи макроэкономического регулирования и пространственного развития»: Сб. науч. тр. II Межд. науч.-практ. конф. научных и научно-педагогических работников общего и профессионального образования / Под редакцией Д.Е. Сорокина, С.В. Шманёва, И.Л. Юрзиновой. 2018. С. 74-80.
- [5] Звягин Л.С. Методологические подходы имитационного моделирования в рамках управления инновациями и социально-экономическим развитием // Экономика и управление: проблемы, решения. 2018. Т. 6. № 12. С. 4-11.
- [6] Коршунов С.А., Николайчук О.А., Павлов А.И. Web-ориентированный компонент производственной экспертной системы // Программные продукты и системы. 2015. №2. С.20-25.
- [7] Кулинич А.А. Модель командной работы агентов с BDI архитектурой // КИИ-2016: сб. тр. XV Национальн. конф. 2016. С. 344-352.
- [8] Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю. Система имитационного моделирования динамики состояний сложных технических систем на основе агентного подхода // Автоматизация в промышленности. 2015. №7. С.44-48.