

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: СОСТОЯНИЕ ОБЛАСТИ НА 2015 ГОД, ТЕНДЕНЦИИ И ПРОГНОЗ

Андрей Борщев
Компания AnyLogic
anylogic.ru

Мы ограничим наш обзор применением имитационного моделирования (ИМ) в области бизнеса и некоторыми научными применениями с использованием инструментов общего назначения. Производство, логистика, цепочки поставок, сфера услуг, потребительский рынок, управление активами и проектами, HR, социальная динамика, здравоохранение – это наша тема. А инженерные и научные применения ИМ, требующие специальных методов и инструментов, например, моделирование в аэродинамике, химии, метеорологии, механике и тому подобные мы оставляем за кадром. Попутно заметим, что приложения ИМ для массового частного потребителя (если не брать в расчёт игровые движки) автору неизвестны.

В статье есть факты, а также есть предположения и догадки. Прогноз развития области – не однозначно позитивный.

ИМ – маленький мир

Хотим мы этого или нет, но мы должны признать, что на сегодняшний день мир ИМ – маленький мир. Маленький, прежде всего, по количеству людей, которые этим занимаются. Маленький (более того, как мы увидим, сокращающийся) по количеству инструментов для создания моделей. Маленький по роли в ежедневном функционировании бизнеса. ИМ-компоненты нечасто являются критическими (mission-critical) частями ИТ-инфраструктуры компании, они не включены в ERP, CRM, WMS и им подобные жизненно важные системы оперативного уровня. Про ИМ говорят *nice to have, not must have* (хорошо, но необязательно). ИМ иногда используется на постоянной основе для принятия оперативных решений, но не является стандартом, обычно существуют упрощённые аналитические альтернативы. Штатное расписание компаний, возьмём средних и крупных, предполагает ИТ-директора, специалистов по ERP, CRM, возможно, разнообразных OR-аналитиков. Специалистов по ИМ по умолчанию там нет.

Текущая роль ИМ – помощь при планировании изменений, оптимизация, сравнение альтернатив, проектирование нового, то есть *стратегический и тактический* уровень. Здесь ИМ действительно может помочь значительно повысить эффективность, сэкономить существенные деньги или даже предупредить катастрофические последствия ошибочных решений. Но: отсюда *проектная*, то есть эпизодическая, непостоянная практика его применения. Отсюда и единственно массовый тип пользователя инструментов ИМ – это *консультант*. То есть человек, обладающий редкими экспертными знаниями в некой технологии, которые время от времени требуются различным бизнес-клиентам. Штатные разработчики моделей в больших компаниях типа GE или Ford – те же консультанты, только внутренние.

Сколько же в мире людей, профессионально строящих ИМ? Официальных исследований на эту тему нет, поэтому в нашем распоряжении только не прямые методы оценки, например, такие:

- Размер профессиональных групп в LinkedIn
- Количество участников конференций по ИМ
- Количество активных лицензий на инструменты ИМ

Простая сумма участников групп LinkedIn по моделированию в различных инструментах ИМ (см. Рис. 1) даёт нам 9,000 человек. При этом надо понимать, что многие разработчики пользуются или, хотя бы, интересуются, двумя и более инструментами. Плюс, в группе есть студенты и аспиранты, нам сейчас не интересные. Количество упоминаний владением различными инструментами ИМ таково: Arena – 133,000 (это, видимо, стопроцентное проникновение Arena в университеты), все остальные в сумме – 14,000.

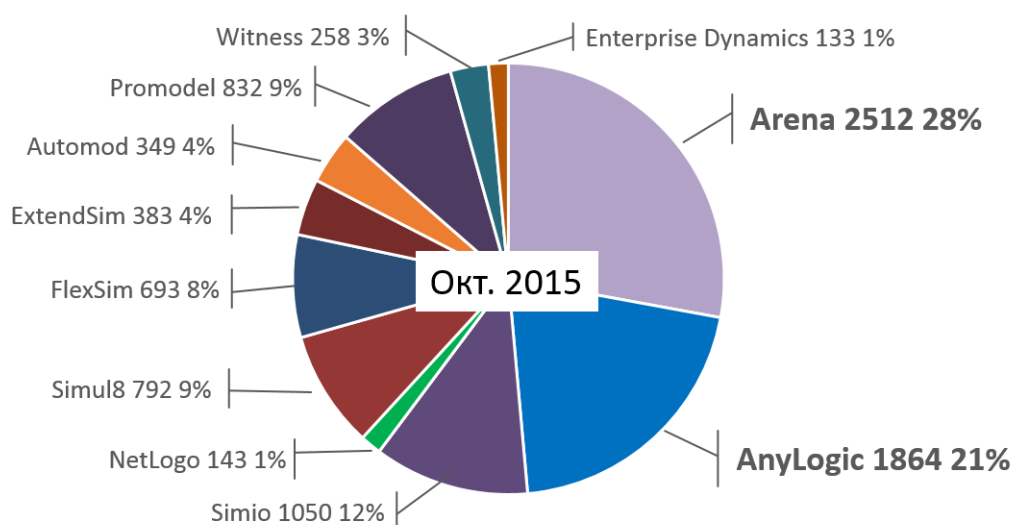


Рис. 1. Размер групп LinkedIn по инструментам ИМ

Что касается конференций, то основная международная конференция разработчиков моделей с фокусом на дискретно-событийное и, последние несколько лет, ещё и на агентное моделирование – Winter Simulation Conference (WSC) [1] – уже много лет собирает не более 500-700 человек (Рис. 2) и не растёт. International System Dynamics Conference [2] держится на уровне 250 участников и посещаемость её постепенно падает. Что и неудивительно, если принять во внимание закрытый, почти сектантский характер сообщества. В Европе нет центральной конференции или выставки по нашему направлению. Наиболее заметное событие – конференция ASIM [4] – немецкоязычного сообщества ИМ. В 2015 году она собрала около 300 человек. Европейский конгресс EUROSIM [3] вообще упал в 2013 г. до 109.

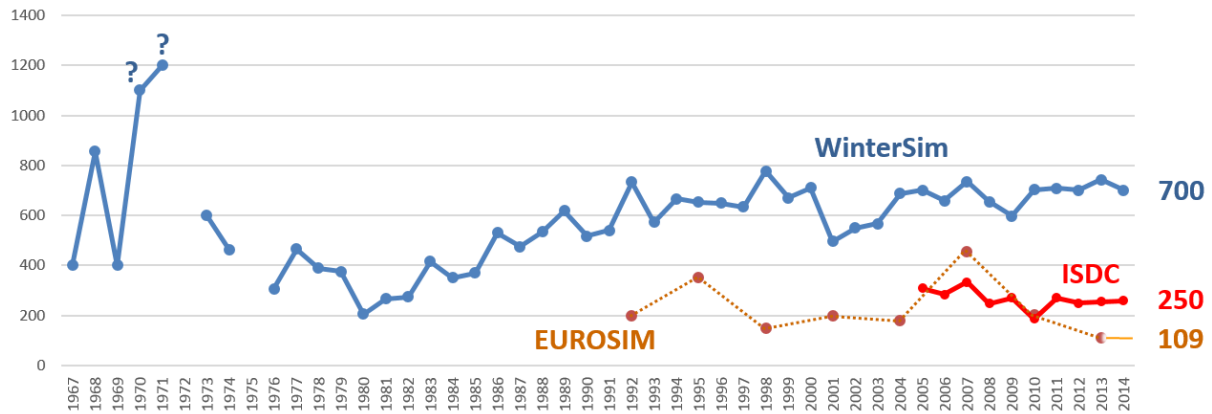


Рис. 2. Посещаемость WSC, ISDC, EUROSIM [4,5,6]

Для сравнения, одна только конференция INFORMS Annual Meeting [5], посвящённая, в основном, неимитационным аналитическим методам, таким как математическое моделирование, статистический анализ, линейное программирование (LP), математическая оптимизация, собирает ежегодно 4,000-5,000 тысяч человек. Распространённость ИМ относительно других методов моделирования и анализа должна выглядеть примерно так, как показано на Рис. 3. Естественно, это качественная оценка.



Рис. 3. Сравнительная распространённость методов моделирования и анализа

Был упомянут ещё один не прямой метод оценки размера нашего профессионального сообщества – количество активных пользователей инструментов ИМ. Эта информация, конечно же, закрыта, так что итоговая цифра ниже – результат сопоставления данных LinkedIn, конференций, “долей рынка” (о них ниже), инсайдерской информации автора и частных разговоров с другими вендорами.

Итак, судя по всему, цифра в **15,000 человек** будет неплохой оценкой для числа профессиональных разработчиков моделей в мире на сегодняшний день. Естественно, мы не учитываем здесь студентов, строящих модели в рамках своих учебных программ. 15,000 – это *очень мало*. Почему нас так мало – увидим позже.

Рынок инструментов ИМ и рынок консалтинга

Сколько денег в год тратят компании и госучреждения на лицензии и поддержку инструментов ИМ и как эти деньги распределяются между вендорами? Аналитики типа Gartner обходят нашу область стороной ввиду почти ничтожного, по их меркам, размера рынка. Все производители инструментом ИМ (вендоры, vendors) – небольшие частные компании, поэтому данные об их выручке закрыты. (Исключениями являются Rockwell Automation, Siemens и Applied Materials, владеющие, соответственно Arena, Plant Simulation и AutoMod, но доходы от продажи этих продуктов, конечно же, занимают там маргинальные доли.) Более того, часто компании-вендоры параллельно занимаются и консалтингом, так что выделить чистую выручку от продажи лицензий без инсайдерской информации невозможно.

В течение последнего года автор обсуждал размер рынка с вендорами других продуктов. Мнения расходятся, но в любом случае получается весьма скромная цифра в районе **30-50 млн долларов**.

Для оценки долей рынка (market shares) в нашем распоряжении также косвенные методы. Помимо уже приведённых цифр по размеру групп в LinkedIn, мы можем посчитать, сколько реальных проектов (case studies), выполненных на различных инструментах, опубликовано в материалах той же WSC. Данные (Рис. 4) оказываются довольно близкими к LinkedIn, так что эти оценки, как минимум, имеют некоторый смысл. Уже по данным за два последних года видно, что доля Arena стремительно сокращается. Arena умирает – говорить об этом стало уже общим местом, обсуждается только, куда мигрируют её пользователи.

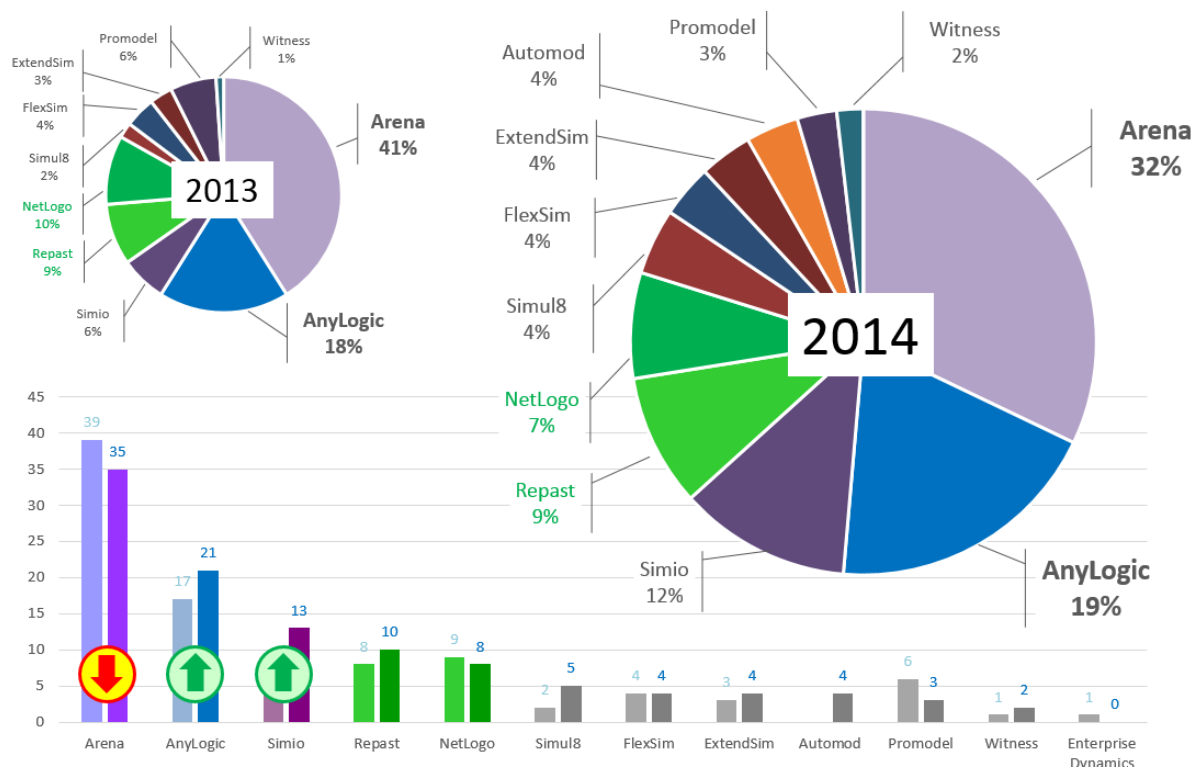


Рис. 4. Количество публикаций WSC (реальные проекты) по применявшимся инструментам

Динамику долей рынка можно проследить по активности вендоров на том же WinterSim за последние 15 лет (Рис. 5). Безвозвратно умерли Quest, MicroSaint, SimProcess и GPSS, а также неграфические продукты CSIM, Silk/SML и SLX. Медленно, но верно прекращают своё существование ExtendSim, ProModel и Witness. Про Arena мы уже сказали. Когда-то мощный Enterprise Dynamics превратился в регионального европейского игрока. Непонятно, выживет ли AutoMod. Судя по всему, рынок в скором времени поделится между следующими продуктами (в алфавитном порядке):

- AnyLogic
- FlexSim
- Simio
- Simul8

Отдельно нужно сказать про Plant Simulation – продукт глубоко проник в немецкий автопром и поддержан там как стандарт. Оттуда он никуда не денется, а экспансия за пределы этого рынка Plant Simulation, похоже, не очень интересна.

Ещё один любопытный факт: компании MathWorks и SAS одновременно пытаются создать инструменты для бизнес-моделирования на своих аналитических платформах. Эти попытки неагрессивны и пока ограничиваются демонстрацией примитивных ДС продуктов. Мы также наблюдаем, что бесплатные open-source инструменты агентного моделирования RePast и NetLogo прочно вошли в обиход – это говорит, в том числе, о росте популярности метода. Мы не упомянули здесь область СД. Там, как и 20 лет назад, всё те же люди покупают всё те же три продукта VenSim, PowerSim, iThink/STELLA, объём продаж невелик.

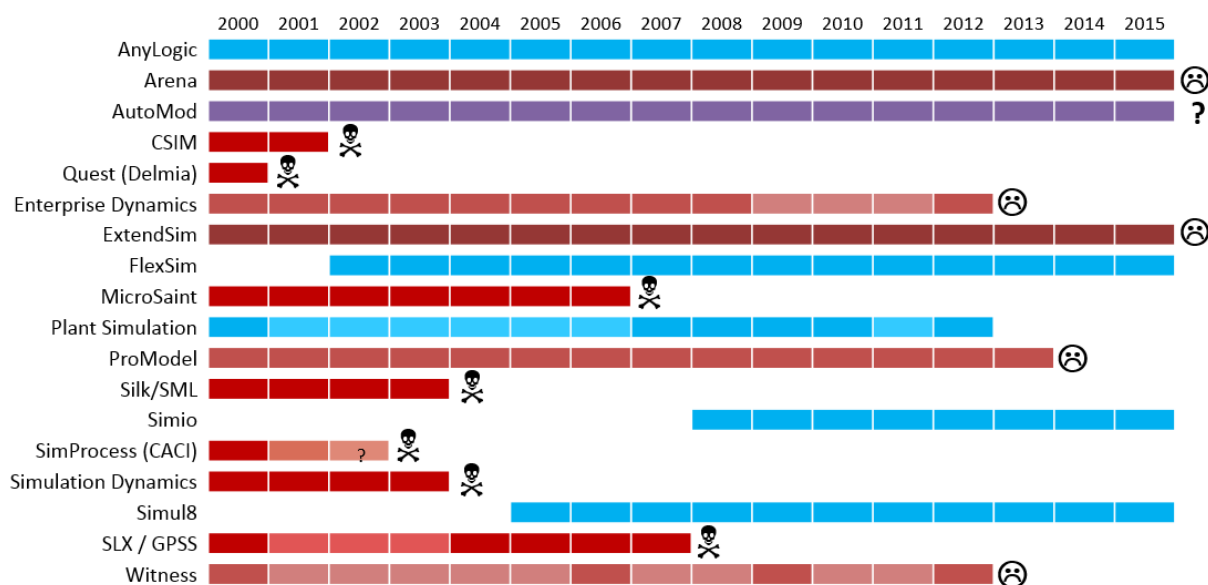


Рис. 5. Активность вендоров на WSC за последние 15 лет

И всё же, в области ИМ оборачивается значительное количество денег, но все находятся они в *консалтинге*. Пример: один проект с применением ИМ для крупного металлургического комбината в настоящий момент выполняется за 2 млн долларов. А это запросто может быть, скажем, треть годовой выручки вендора какого-нибудь продукта. Проект для фармацевтической компании

длительностью в полгода, который выполняет один специалист по ИМ, стоит 350,000 долларов. Оценивать объём рынка консалтинга с элементами ИМ мы сейчас не будем, но понятно, что он в сотни раз больше, чем рынок самих инструментов ИМ, см. Рис. 6. Всю эту “добавленную стоимость” создают консультанты, и требования к ним, как мы увидим далее, предъявляются очень серьёзные.



Рис. 6. Денежная “воронка” в ИМ

Что должен знать и уметь профессионал ИМ?

Давайте подумаем, какими знаниями и умениями должен обладать профессиональный разработчик ИМ, способный применять рассмотренные нами инструменты общего назначения для более или менее широкого спектра задач. (“Теоретики”, рассуждающие на конференциях о чём-то типа “полиморфизма мультимодельных конгломератов”, нас не волнуют. Они занимаются тем, что никому не нужно и, скорее всего, неинтересно им самим.)

Способность разговаривать и учиться

Поскольку ИМ создаются, в основном, консультантами, разработчик модели часто не является экспертом в предметной области. Поэтому он должен уметь разговаривать с заказчиком, “извлекать” из него постановку задачи, быстро разбираться в том, как работает ранее незнакомый бизнес (на время проекта, в идеале, нужно думать о нём, как о своём). Возможно, понадобится самому найти нужного человека или нужные данные на стороне заказчика. Здесь необходимы навыки общения и определённая гибкость ума, способность быстро учиться.

Знание смежных и альтернативных технологий

У вас нет цели построить ИМ, у вас есть цель решить проблему. Поэтому на начальных этапах проекта нужно задаваться вопросом: действительно ли это задача для ИМ, или лучше использовать другой подход? Анализ задачи может показать, что решение лучше искать, например, линейным программированием, оптимизацией в комбинации с эвристиками, или просто написав простую программу или пару скриптов на VB в Excel.

Другие подходы могут быть не альтернативой ИМ, а дополнять его. LP, например, может использоваться для получения первого приближения перед

имитацией, эвристики и локальная оптимизация могут быть частью алгоритмов принятия решений в процессе выполнения модели.

Естественно, нужно знать преимущества, недостатки, ограничения применимости, вычислительную сложность разных подходов и уметь сопрягать их с ИМ. Инструменты с соответствующей функциональностью хорошо представлены на INFORMS Annual Meeting [8], см. Рис. 7.



Рис. 7. Некоторые вендоры неимитационных продуктов

Искусство упрощать, структурировать и выбирать метод моделирования

Выбор уровня абстракции и метода моделирования – центральный вопрос в построении модели. Какие допущения мы вправе сделать? Где границы моей модели, то есть что мы считаем заданным и внешним, а что – моделируем? Каков оптимальный уровень детализации – по структуре? по событиям и времени? На какую модельную конструкцию мне лучше отобразить реальный объект – заявка в процессе? агент? единица в непрерывном потоке? Ответы на все эти вопросы не формализуемы. *Это область искусства, опыта и интуиции, а не науки и технологии.* Соответственно, у создателя модели, помимо знания различных методов и языков моделирования, должен быть некий дар, чутьё. Этот дар более редкий, чем у продвинутого программиста, умеющего хорошо структурировать задачу: разработчик ИМ имеет дело с ещё с одной размерностью – временем.

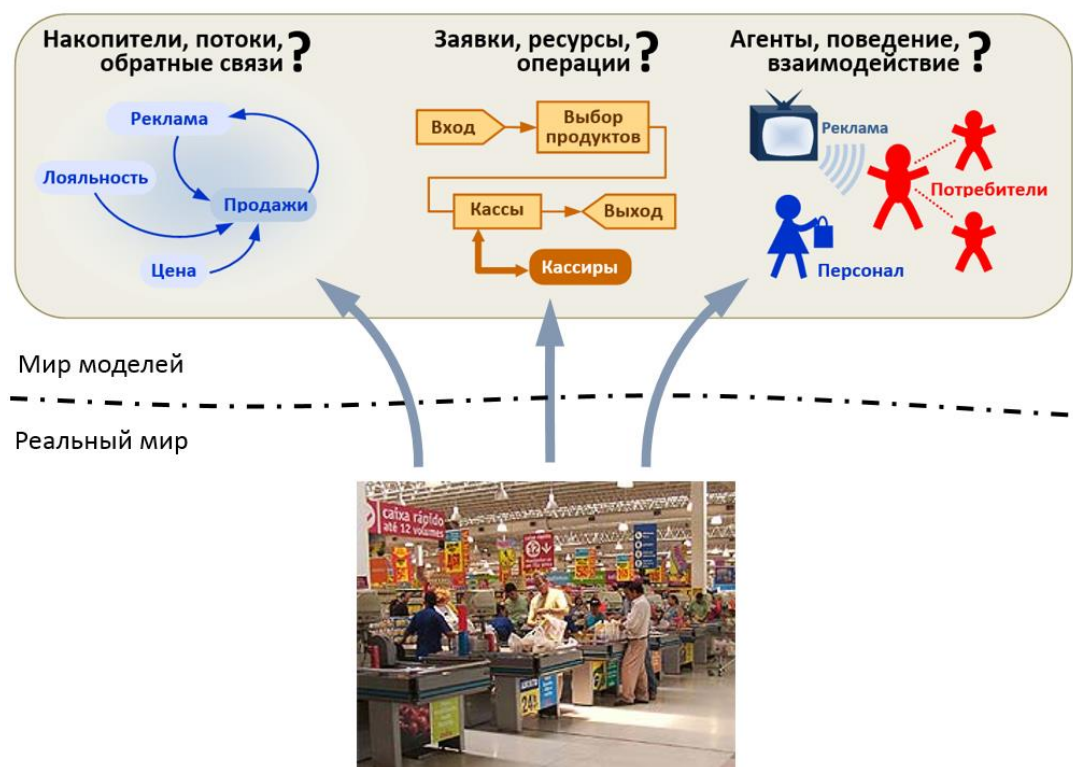


Рис. 8. Выбор метода и уровня абстракции

Минимализм и готовность выбрасывать части своей работы

Желание отразить в модели как можно больше деталей реального мира – типичная ошибка начинающих разработчиков ИМ. Стремиться нужно ровно к противоположному – к минимально возможной модели, решающей поставленную задачу. Следуйте принципу бритвы Оккама: если вы пока что можете обойтись без какой-либо детали, её не должно быть в модели.

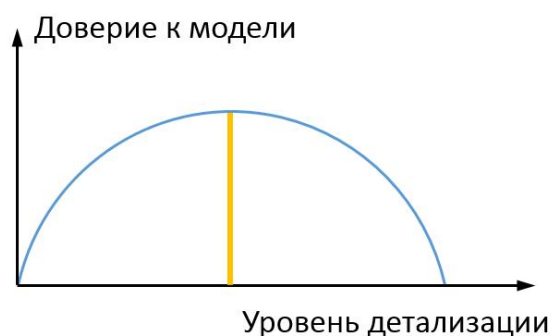


Рис. 9. “Упрощай” – хорошее напоминание при разработке модели. Зависимость доверия к модели от её сложности [9,10]

Основной принцип процесса разработки ИМ – итеративность. Если вы почувствовали, что ранее созданная часть перестала вписываться в общую архитектуру – выбрасывайте её с радостью и без сожаления, заменяйте новой, переработанной с учётом нового понимания задачи. Такие итерации не замедляют, а ускоряют разработку.

Теория вероятности и статистика

Реальный мир полон неопределённостей и нужно уметь отражать это в ИМ, то есть строить стохастические модели (почти все дискретно-событийные (ДС) и агентные модели (АМ) стохастические, системно-динамические (СД) модели обычно детерминированные). Поэтому необходимы базовые знания теории вероятности и статистики, знание основных распределений, умение пользоваться инструментами подбора аналитических распределений по рядам “исторических” данных (distribution fitting). Естественно, необходимо понимать, что в модели случайные числа – псевдослучайные, выходящие потоком из генератора случайных чисел (random number generator, RNG). Это даёт преимущество в виде воспроизводимости экспериментов, но создаёт проблемы корреляции, так что нужно думать о том, сколько и каких RNG использовать. Интерпретация результатов выполнения стохастической модели – отдельная тема. Разработчик модели должен знать, сколько прогонов (репликаций, replications) необходимо сделать, как проводить оптимизацию в условиях неопределённости (optimization under uncertainty).

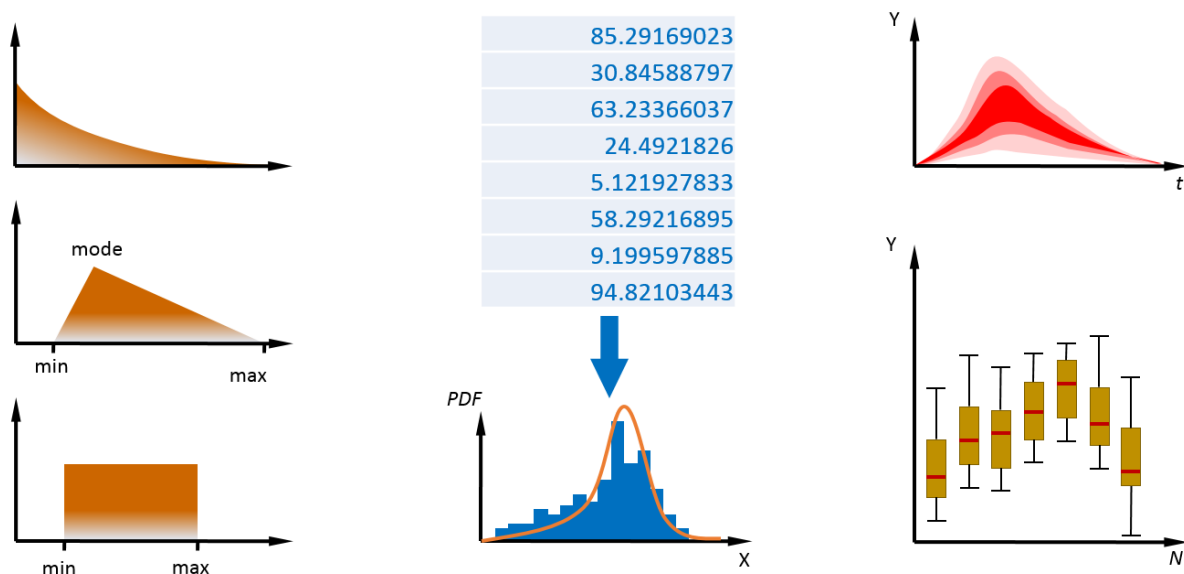


Рис. 9. Основные распределения, подбор распределений, визуализация результатов стохастической модели

Дискретное и непрерывное, линейное и нелинейное

В зависимости от задачи, разработчик ИМ может иметь дело как с дискретными сущностями, так и с непрерывными. Зерно, нефть, вода, деньги, жидкие ингредиенты в производстве – очевидные примеры последних. А иногда и явно дискретные объекты (транзакции, заказы, клиенты, товары, детали) имеет смысл представить в виде непрерывной материи (системная динамика поступает так со всем вообще). Поэтому создатель ИМ должен знать, как моделировать динамику непрерывных сред. Если потоки кусочно-постоянные (соответственно, накопители кусочно-линейные), то можно использовать библиотеки типа discrete rate [11], основанные на линейном программировании (LP solvers). А если динамика более сложная, есть обратные связи, то потребуются численный решатель дифференциальных уравнений (numeric solver) и, описание задачи в виде, например, СД диаграммы. Кроме того, нужно уметь сопрягать дискретные и непрерывные части модели.

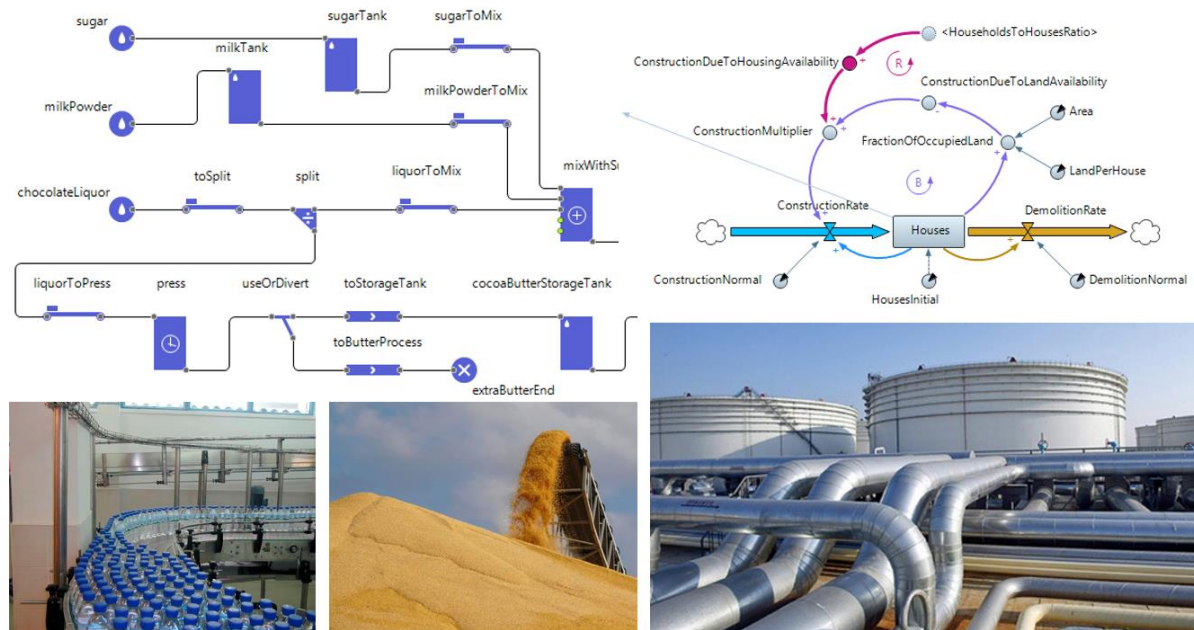


Рис. 9. Моделирование непрерывных сущностей. Диаграмма discrete rate блоков. СД диаграмма

Программирование (алгоритмы и структуры данных)

Бывает, конечно, что ИМ строится исключительно мышью в графическом редакторе путём перетаскивания блоков, рисования, и выбора опций из списка. Но это, за исключением СД, редко. Абсолютное большинство неигрушечных моделей содержит код для описания структур данных и алгоритмов “нединамической” логики, например, нестандартных политик управления запасами, принятия решений потребителем на основе лояльности, цены и рекламы, управления сложными ресурсами типа пары конфликтующих пролётных кранов, а также для взаимодействия с внешними данными. Этот код дополняет диаграммы процессов, потоков и состояний. Поэтому разработчик моделей – ещё и программист, умеющий конструировать структуры данных и писать для них эффективные алгоритмы. Все профессиональные инструменты ИМ предоставляют тот или иной скрипт или язык программирования и возможность “вписаться” в графические конструкции.

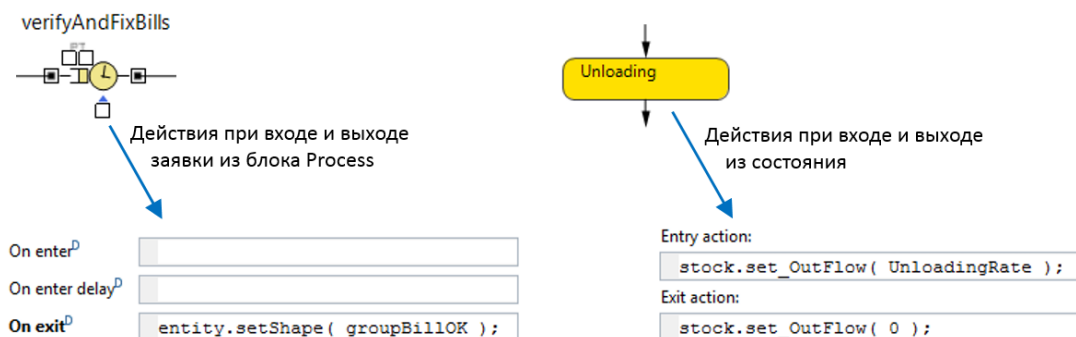


Рис. 10. Фрагменты программного кода, дополняющие графические конструкции

Специфика агентного моделирования

Агентное моделирование (АМ) создаёт дополнительные требования к разработчику ИМ. Во-первых, это умение думать в терминах объектов, взаимодействующих без единого центра управления. Здесь пригодятся базовые знания из теории распределённых и параллельных систем, в частности, протоколов связи (синхронность и асинхронность, дедлоки, недетерминированное поведение). Полезным бывает использование диаграмм обмена сообщениями (message sequence diagrams). Диаграммы состояний (statecharts) широко используются для задания индивидуального поведения агентов. В определённом классе АМ необходимо знание социальных сетей (social networks). В АМ часто помогает объектно-ориентированное мышление: типы агентов организуются в иерархию классов с наследованием. Наконец, в АМ приходится программировать в среднем больше, чем в ДС или СД.

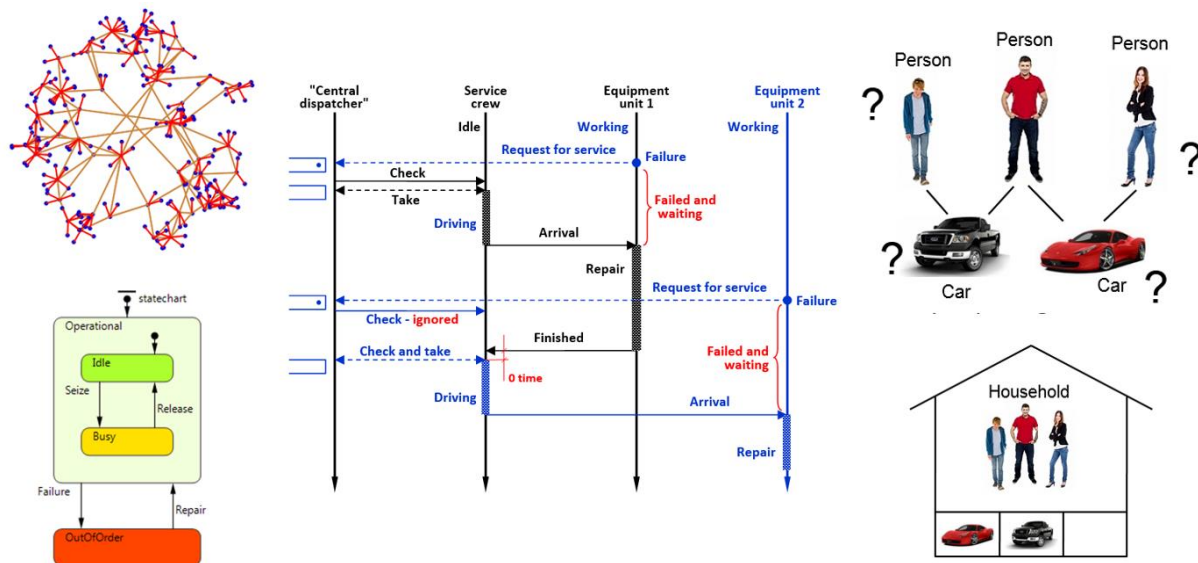


Рис. 11. Сеть агентов, стейтchart, диаграмма обмена сообщениями, выбор что будет агентом

Но всё равно, и в АМ центральным остаётся умение отобразить реальный мир на мир моделей. Например, что будет агентом? Иногда это совсем неочевидно. Например, в модели автомобильного рынка Северной Америки, сделанной по следам работы [12], агентом, после нескольких итераций, был выбран не индивидуальный потребитель, а семья (household, домохозяйство), совместно владеющая несколькими автомобилями и совместно принимающая решения об их покупке и продаже.

Графический дизайн, дизайн интерфейса и 3D-моделирование

ИМ имеет естественное преимущество перед другими аналитическими технологиями в виде возможности показать развитие событий во времени и даже смешиваться в них. Надо умело этим пользоваться. Интерактивная 2D и 3D анимация давно стала стандартным требованием к модели, а её привлекательность и убедительность может быть решающим фактором при сдаче проекта. Хороший разработчик ИМ должен, в идеале, иметь художественный вкус, обладать навыками графического дизайна, дизайна интерфейса пользователя и 3D моделирования.

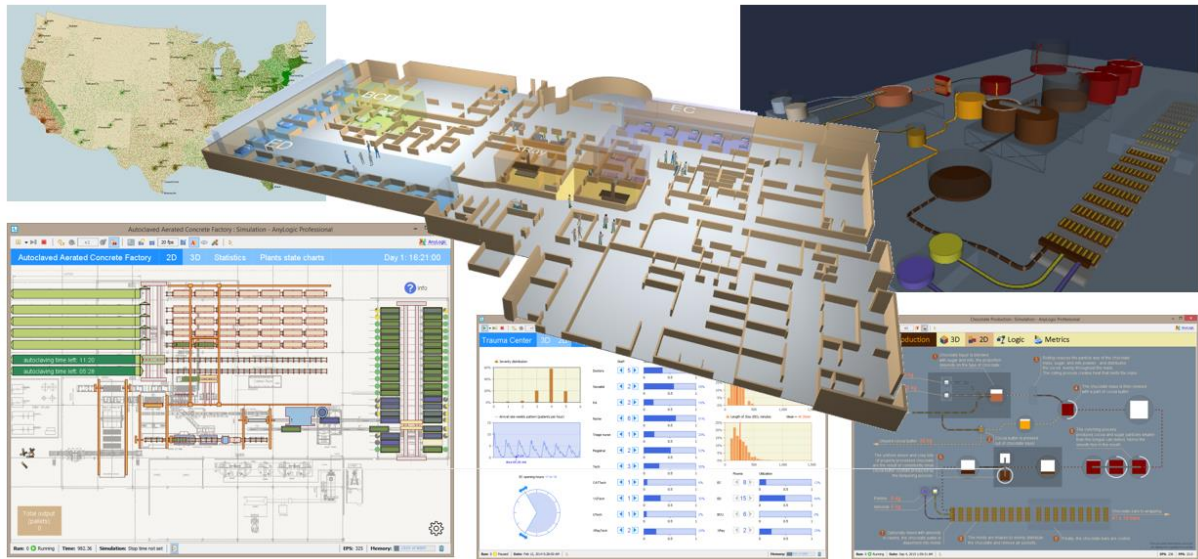


Рис. 12. Примеры 2D и 3D анимации и интерфейса пользователя

Прогноз – что будет с областью ИМ в ближайшие годы?

Не очень хорошая новость

ИМ – это *сложно*. Перечень качеств, необходимых профессионалу ИМ мы можем резюмировать так: в ближайшие годы нас будет *не больше, а меньше*. Таков будет результат текущей тенденции к упрощению всего и вся и навязываемой жизнью невозможности длительно концентрироваться и углубляться (безоценочная констатация, автор не считает, что это плохо). Впрочем, спрос на высококлассных разработчиков моделей всё равно никуда не денется и, конечно же, не даст нашему сообществу ужаться до нуля :)

Рынок для инструментов ИМ общего назначения не будет расти. Более того, как мы уже показали, в ближайшее время некоторые из них окончательно прекратят своё существование, а их доли перераспределятся между четырьмя-пятью живыми, продолжающими разработку игроками. Показательно, что на Winter Simulation Conference 2015 выставочные стенды из рассмотренных нами компаний имеют только вендоры AnyLogic, Arena, FlexSim, ExtendSim, Simio и Simul8 (данные на 26 ноября [16]). 15 лет назад таких было в два-три раза больше.

Хорошая новость

Вместе с этим, практическое применение ИМ растёт сейчас, и рост продолжится. Факторы роста таковы:

- Как ни странно, но в смысле осведомлённости (awareness) о возможностях ИМ рынок ещё далек от насыщения – до сих пор есть много крупных компаний, где ИМ вообще не используется.
- Рост сложности бизнеса и запросов на его оптимизацию
- Рост производительности компьютеров, соответственно, рост возможностей ИМ
- Новые области применения, принесённые агентным моделированием
- (редко) Нормы и законы. Отдельно заметим, что автор против принятия в России любых норм, обязывающих проводить имитационную экспертизу

проектов – мы легко можем себе представить, какие будут делаться модели и по какой схеме.

Заметим попутно, что Big Data сейчас мало стимулируют интерес к ИМ, это будет позже. Пока что Big Data используется в основном для анализа происходящего, но не для предсказания и оптимизации [15].

On average across the company, where do your company's Big Data analytics capabilities fall on the spectrum below?

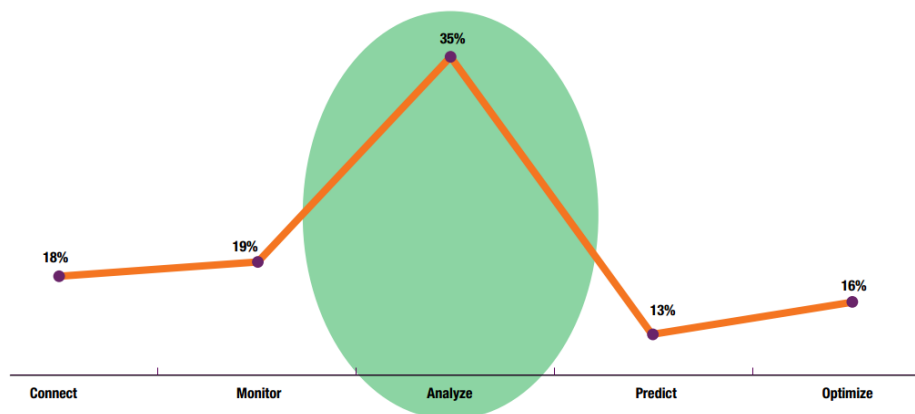


Рис. 13. Ответ на вопрос “Где в этом спектре ваша компания использует возможности Big Data?” [15]

Рост спроса на ИМ будет удовлетворён в основном за счёт специализированных (построенных под конкретную предметную область, vertical) инструментов и библиотек более высокого уровня, предоставляющих упрощённый интерфейс и *снижающих требования к пользователю*. Мы уже видим успешные продукты в области моделирования пешеходных потоков, дорожного движения, автомобилестроения, протоколов и сетей связи. На сегодняшний момент одна из “горячих тем” – цепочки поставок (supply chains), мы на пороге появления мощных оптимизационных продуктов, основанных на ИМ (таков, в частности, anyLogistix [18], разрабатываемый нашей компанией). Несомненно, в скором времени появятся и продукты в области HR, потребительских рынков, управления парками, сетей трубопроводов, услуг здравоохранения и т.п., использующие ИМ.



Рис. 13. Развитие инструментов ИМ в сторону verticals и примерный сравнительный размер рынков

Кроме того, ИМ-компоненты будут всё больше встраиваться в специализированные аналитические платформы для поддержки принятия решений, такие, например, как GE Brilliant Factory [13], в рамках инициативы Industrial Internet [14]. Но эти компоненты будут хорошо упрятаны за проблемно-ориентированным интерфейсом, так что конечный пользователь даже не будет знать, что за числами, графиками и рекомендациями стоит наша с вами кухня событий, дифференциальных уравнений, агентов, стейтчартов, процессов и заявок.

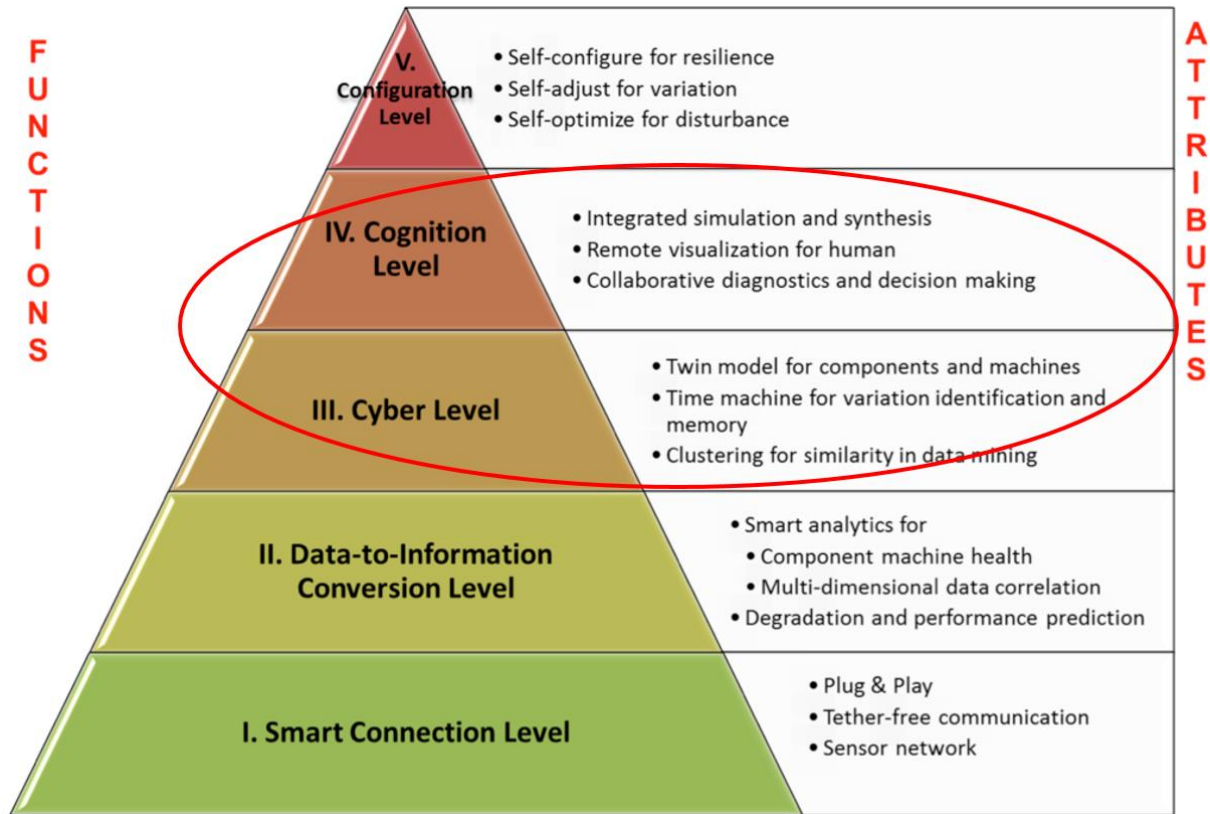


Рис. 14. ИМ – часть концепции Industrial Internet [14]

Что нас ждёт в области методологии и технологии

В области методов и языков ИМ ситуация следующая. СД практически не изменилась за последние 50 лет, там происходит фиксация status quo в виде попытки создать универсальный язык обмена СД-моделями (проект XMILE [17]). В ДС моделировании также не происходит ничего принципиально нового, идёт создание более удобных блоков описания процессов, сама же концепция не поменялась с 1960-х годов. Единственным прорывом за XXI век стало появление и начало практического использования АМ, а также комбинирование методов с целью получить более естественное отображение задачи. Кроме того, конечно же, происходит интеграция ИМ с новыми технологиями, например, с GIS-сервисами.



Рис. 15. Прогресс в области методов ИМ

С момента возникновения первых графических инструментов ИМ общего назначения и по сегодняшний день они оставались традиционными “oldschool” desktop-приложениями. Возможно, некоторые из вендоров и продублируют интерфейс разработки моделей в браузере, но это не будет чем-то, меняющим правила игры: интерфейс по определению сложный и без мыши и клавиатуры там делать нечего.

CLOUD

- Параллельное выполнение многопрогонных экспериментов
- Хранение моделей, наборов параметров и результатов

BROWSER

- Управление экспериментами
- Просмотр анимации
- Просмотр и анализ результатов
- Взаимодействие пользователей



Рис. 16. Всё, кроме разработки моделей, переместится в облако и браузер

А вот в области выполнения ИМ, управления выполнением и доставки результатов пользователю нас ждут очень интересные изменения, см. Рис. 16. Коротко сформулируем это так: выполнение ИМ будет полностью перенесено в облако и распараллелено, туда же отправится хранение моделей, сценариев запуска и результатов, а управление экспериментами и результатами (scenario management) – перейдёт в браузер. Уже есть попытки в этом направлении, см., например, [19,20], а также обзор по инструментам ИМ для инженеров [22]. Запускать модель можно будет из любого места, с любого устройства и там же можно будет сравнить результаты запусков и оптимизаций, а также посмотреть 2D и 3D анимацию.

Ссылки

- [1] www.wintersim.org
- [2] conference.systemdynamics.org
- [3] www.eurosim.info
- [4] www.asim-gi.org
- [5] www.wintersim.org/2014/pastconf.html
- [6] conference.systemdynamics.org/past_conferences
- [7] www.asc.tuwien.ac.at/eurosim/index.php?id=44
- [8] www.informs.org/Attend-a-Conference/Annual-Meeting
- [9] Lobão, E.C. and Porto, A.J.V. A simulation study systematization. (Portuguese) In: Proceedings of the XVII ENEGEP, Gramado, Rio Grande do Sul, Brazil1, 997.

- [10] Chwif, L., Barreto, M.R.P, Paul, R.J. On Simulation Model Complexity
- [11] Krah D. 2009. ExtendSim Advanced Technology: Discrete Rate Simulation. In: Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin and R. G. Ingalls, eds.
- [12] Keenan P. and Paich M. Modeling General Motors and the North American Automobile Market. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society, Oxford, England, 2004.
- [13] www.gereports.com/post/114774680705/personalized-production-the-brilliant-factory
- [14] en.wikipedia.org/wiki/Industrial_Internet
- [15] www.ge.com/digital/sites/default/files/industrial-internet-insights-report.pdf
- [16] www.wintersim.org/2015/exhibits.html
- [17] www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=xmile
- [18] www.anylogistix.com
- [19] www.simul8.com/products/simul8_web
- [20] forio.com
- [21] www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/6356/Simulation-in-the-Cloud-is-Becoming-Mainstream.aspx