Имитационное моделирование: состояние области на 2015 год, тенденции и прогноз

А.В. Борщев (Компания AnyLogic)

Рассматривается коммерческое применение имитационного моделирования (ИМ) в таких областях, как производство, логистика, цепочки поставок, сфера услуг, потребительский рынок, управление активами и проектами, HR, здравоохранение, а также некоторые научные применения. Обзор ограничивается использованием инструментов ИМ общего назначения. Инженерные и научные применения ИМ, требующие специальных методов и инструментов, например, моделирование в аэродинамике, химии, метеорологии, механике и тому подобные, не рассматриваются.

Ключевые слова: имитационное моделирование, консалтинг, оптимизация, дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование, системная динамика, инструменты имитационного моделирования.

ИМ — маленький мир

Необходимо признать, что на сегодняшний день мир ИМ — маленький мир. Маленький, прежде всего, по числу людей, которые этим занимаются. Маленький (более того, сокращающийся) по числу инструментов для создания моделей. Маленький по роли в ежедневном бизнесе. ИМ-компоненты нечасто являются критическими частями IT-инфраструктуры компании, они не включены в жизненно важные системы оперативного уровня типа управления предприятием (ERP), складом (WMS), работы с клиентами (CRM) и им подобные. Про ИМ говорят: *хорошо, но необязательно*. ИМ иногда используется на постоянной основе для принятия оперативных решений, но не является стандартом, обычно существуют упрощенные аналитические альтернативы. Штатное расписание компаний, даже средних и крупных, предполагает IT-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. Следствие этой роли — *проектная*, то есть эпизодическая, непостоянная практика применения ИМ. 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 клиентам. Штатные разработчики моделей в больших компаниях — те же консультанты, только внутренние.

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

- размер профессиональных групп в LinkedIn;
- число участников конференций по ИМ;
- число активных лицензий на инструменты ИМ.

Простая сумма участников групп LinkedIn по моделированию в различных инструментах ИМ (рис. 1) дает нам около 10 тыс. человек. При этом надо понимать, что многие разработчики пользуются или хотя бы интересуются двумя и более инструментами. Плюс в группах есть студенты и аспиранты, которых мы не рассматриваем. Число упоминаний владением различными инструментами ИМ таково: Arena — 22 тыс., все остальные в сумме — 25 тыс.

Что касается конференций, то основная международная конференция разработчиков моделей с фокусом на дискретно-событийное (ДС) и агентное моделирование (АМ) — Winter Simulation Conference (WSC) (www.wintersim.org) — уже много лет собирает не более 500...700 человек и не растет. International System Dynamics Conference (conference.systemdynamics.org) держится на уровне 250 участников, и посещаемость ее постепенно падает. Это и неудивительно, если принять во внимание закрытый, почти сектантский характер сообщества системной динамики (СД). В Европе нет центральной конференции или выставки по данному направлению. Наиболее заметное событие — конференция ASIM (www.asim-gi.org) — немецкоязычного сообщества ИМ. В 2015 г. она собрала около 300 человек. Европейский конгресс EUROSIM (www.eurosim.info) вообще упал в 2013 г. до 109 человек.

Для сравнения, только одна конференция INFORMS Annual Meeting (www.informs.

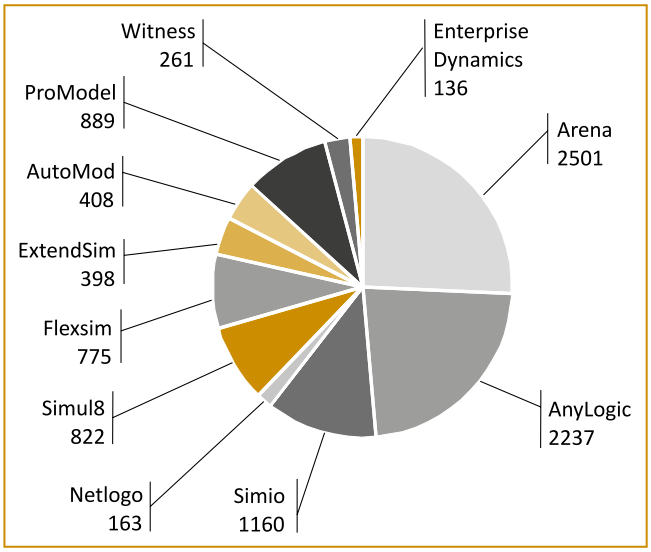

Рис. 1. Размер групп LinkedIn по инструментам ИМ на январь 2016 г.

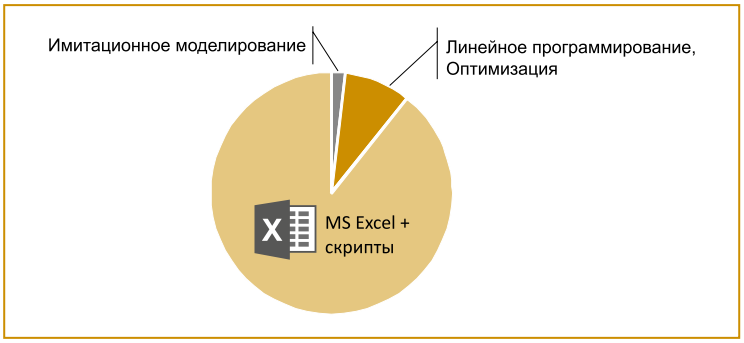

Рис. 2. Сравнительная распространенность методов моделирования и анализа

org/Attend-a-Conference/Annual-Meeting), посвященная в основном неимитационным аналитическим методам, таким как математическое моделирование, статистический анализ, линейное программирование (LP), оптимизация, собирает ежегодно 4...5 тыс. человек. Распространенность ИМ относительно других методов моделирования и анализа должна выглядеть примерно так, как показано на рис. 2. Естественно, это качественная оценка.

Информация о численности активных пользователей инструментов ИМ, конечно же, закрыта. Итоговая цифра, приведенная ниже, — результат сопоставления данных LinkedIn, конференций, "долей рынка", инсайдерской информации автора и частных разговоров с другими производителями инструментов ИМ ("вендорами").

Итак, судя по всему, цифра в 15 тыс. 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.) Пятнадцать тысяч — это *очень мало*. Почему нас так мало, увидим позже.

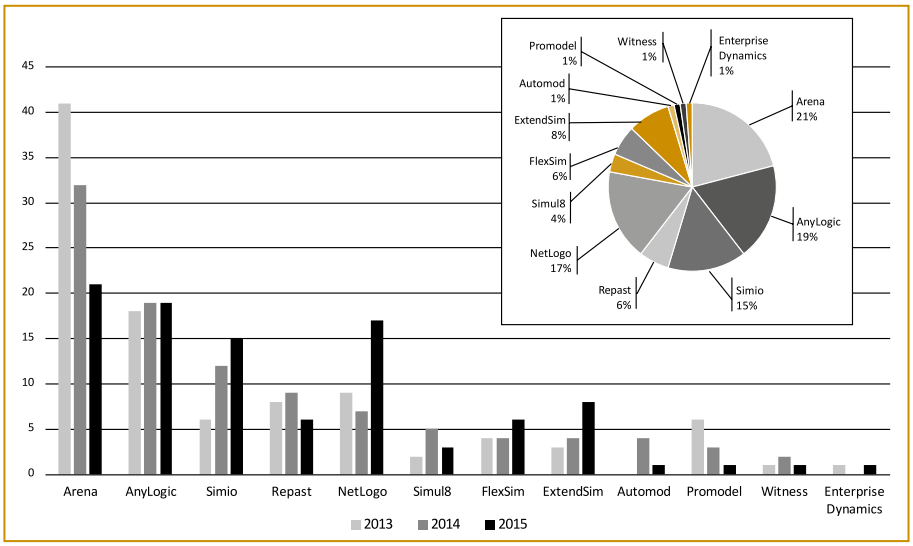

Рис. 3. Процентное соотношение публикаций WSC по применявшимся инструментам за последние три года. На круговой диаграмме – 2015 г.

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 эту область стороной ввиду почти ничтожного, по их меркам, размера рынка. Все вендоры (за исключением трех) — небольшие частные компании, поэтому данные об их выручке закрыты. 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 производителями других продуктов. Мнения расходятся, но в любом случае получается весьма скромная цифра в районе 30...50 млн. долл. США.

Для оценки долей рынка в нашем распоряжении также косвенные методы. Помимо уже приведенных цифр по размеру групп в LinkedIn, можно подсчитать, сколько реальных проектов, выполненных на различных инструментах, опубликовано в материалах WSC. Данные (рис. 3) оказываются довольно близкими к LinkedIn, так что эти оценки как минимум имеют некоторый смысл.

Динамику долей рынка можно проследить по активности вендоров на той же WSC за последние 15 лет. Доля абсолютного лидера стремительно сокращается, умерли многие активные участники WSC начала 2000-х гг. Другие медленно, но верно прекращают свое существование или превращаются в региональных игроков. По мнению автора, рынок в скором времени поделится между четырьмя-пятью ведущими компаниями.

Еще 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 простых ДС продуктов. Мы также наблюдаем, что бесплатные инструменты агентного моделирования с открытым кодом RePast и NetLogo прочно вошли в обойму. Это говорит, в том числе о росте популярности метода. Мы не упомянули здесь область СД. Там, как и 20 лет назад, присутствуют все те же три продукта: VenSim, PowerSim, iThink/STELLA; объем продаж невелик.

И все же, в области ИМ оборачивается значительный объем денег, но весь он приходится на *консалтинг*. Пример: один

проект с применением ИМ для крупного металлургического комбината в настоящий момент выполняется за 2 млн. долл. США, что может составить, например, треть годовой выручки вендора какого-либо продукта. Проект для фармацевтической компании длительностью в полгода, который выполняет один специалист по ИМ, стоит 350 тыс. долл. США. Оценка объема рынка консалтинга с элементами ИМ — отдельная тема, но понятно, что он в сотни раз больше, чем рынок самих инструментов ИМ. Всю эту "добавленную стоимость" создают консультанты, и требования к ним предъявляются очень серьезные.

Что должен знать и уметь профессионал ИМ?

Давайте подумаем, какими знаниями и умениями должен обладать профессиональный разработчик ИМ, способный применять рассмотренные инструменты общего назначения для более или менее широкого спектра задач.

Способность разговаривать и учиться

Поскольку разработчик модели часто не является экспертом в предметной области, 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 нем, как о своем. Возможно, понадобится самому искать нужного человека или нужные данные на стороне заказчика. Здесь необходимы навыки общения и определенная гибкость ума, способность быстро учиться.

Знание смежных и альтернативных технологий

Цель проекта — не построить ИМ, цель — решить проблему заказчика. Поэтому на начальных этапах 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 же просто написанием простой программы или VB-скрипта в Excel.

Другие подходы могут быть не альтернативой ИМ, а его дополнением. Например, LP 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.

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 модели, то есть что мы считаем заданным и внешним, а что — моделируем? Каков оптимальный уровень детализации — по структуре, по событиям, по времени? На какую модельную конструкцию лучше отобразить реальный объект — заявка в процессе, агент, единица в непрерывном потоке? Ответы на 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, чутье. Этот дар более редкий, чем у квалифицированного программиста, умеющего хорошо структурировать задачу: разработчик ИМ имеет дело еще с одной размерностью — временем.

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, ее не должно быть в модели.

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

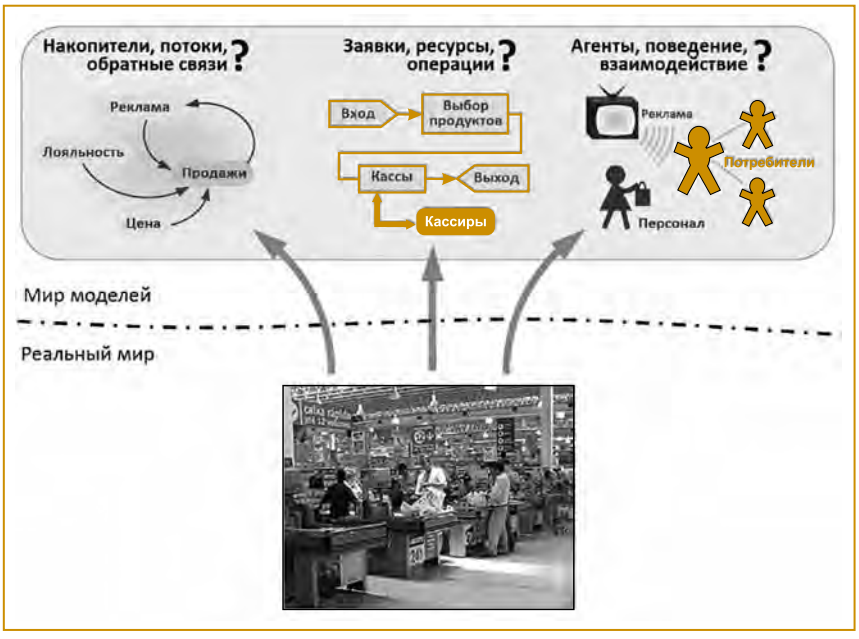

Рис. 4. Выбор метода и уровня абстракции

Теория вероятности и статистика

Реальный мир полон неопределенностей, и нужно уметь отражать это в ИМ, то есть строить стохастические модели (почти все дискретно-событийные и агентные модели стохастические, системно-динамические модели обычно детерминированные). Поэтому необходимы базовые знания теории вероятности и статистики, знание основных распределений, умение пользоваться инструментами подбора аналитических распределений по рядам "исторических" данных. Естественно, необходимо понимать, что в модели случайные числа — псевдослучайные, выходящие потоком из генератора случайных чисел (RNG). Это дает преимущество в виде воспроизводимости экспериментов, но создает 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") необходимо сделать, как проводить оптимизацию в условиях неопределенности.

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 имеет смысл представить в виде непрерывной материи и явно дискретные объекты — транзакции, заказы, клиенты, товары, детали (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 [1], основанные на линейном программировании. А если динамика более сложная, есть обратные связи, то потребуется численный решатель дифференциальных уравнений и описание задачи в виде, например, СД диаграммы. Кроме того, нужно уметь сопрягать дискретные и непрерывные части модели.

Программирование (алгоритмы и структуры данных)

Бывает, конечно, что ИМ строится исключительно мышью в графическом редакторе путем 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 пролетных кранов, а также для взаимодействия с внешними данными. Этот код дополняет диаграммы процессов, потоков и состояний. Поэтому разработчик моделей — еще 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.

Специфика агентного моделирования

Агентное моделирование (АМ) создает дополнительные требования к разработчику ИМ. Во-первых, это умение думать в терминах объектов, взаимодействующих без единого центра управления. Здесь пригодятся базовые знания из теории распределенных и параллельных систем, в частности, протоколов связи (синхронность и асинхронность, дедлоки, недетерминированное поведение). Полезным бывает использование диаграмм обмена сообщениями. Диаграммы состояний ("стейтчарты") широко используются для задания индивидуального поведения агентов. В определенном классе АМ необходимо знание теории социальных сетей. 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.

Но все равно, и в АМ центральным остается умение отобразить реальный мир на мир моделей. Например, что будет агентом? Иногда это совсем неочевидно. Например, в одной из моделей автомобильного рынка Северной Америки агентом после нескольких итераций был выбран не индивидуальный потребитель, а семья, владеющая несколькими автомобилями и совместно принимающая решения об их покупке и продаже [2].

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 вмешиваться в них. Надо умело этим пользоваться. Интерактивная 2D и 3D анимация давно стала стандартным требованием к модели, а ее 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.

Прогноз — что будет с областью ИМ в ближайшие годы?

Не очень хорошая новость

ИМ — это *сложно*. Перечень качеств, необходимых профессионалу ИМ, можно 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 все 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 в ближайшее время некоторые из продуктов окончательно прекратят свое существование, а их доли перераспределятся между четырьмя-пятью живыми, продолжающими разработку игроками.

Хорошая новость

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

• Как ни странно, но в смысле осведомленности о возможностях ИМ рынок все еще 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, принесенные агентным моделированием.

• Нормы и законы (редко). Отдельно заметим, что автор однозначно против принятия в РФ любых норм, обязывающих проводить имитационную экспертизу проектов: легко 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.

Рост спроса на ИМ будет удовлетворен в основном за счет специализированных (построенных под конкретную предметную область, vertical) инструментов и библиотек более высокого уровня, предоставляющих упрощенный интерфейс и *снижающих требования к пользователю*. Уже существуют успешные продукты в области моделирования пешеходных потоков, дорожного движения, автомобилестроения, протоколов и сетей связи. На сегодняшний момент одна из “горячих тем” — цепочки поставок. Мы на пороге появления мощных оптимизационных продуктов, основанных на ИМ. Несомненно, в скором времени появятся и продукты в области потребительских рынков, управления парками, сетей трубопроводов, услуг здравоохранения и т. п., использующие ИМ.

Кроме того, ИМ-компоненты будут все больше встраиваться в специализированные аналитические платформы для поддержки принятия решений, такие, например, как GE Brilliant Factory (www.gereports.com/post/114774680705/personalized-production-the-brilliant-factory), в рамках инициативы Industrial Internet (en.wikipedia.org/wiki/Industrial_Internet). Но эти компоненты будут хорошо упрятаны за проблемно-ориентированным интерфейсом, так что конечный пользователь даже не будет знать, что за числами, графиками и рекомендациями стоят события, дифференциальные уравнения, агенты, стейтчарты, процессы и заявки.

Что нас ждет в области методологии и технологии

В области методов и языков ИМ ситуация следующая. Системная динамика практически не изменилась за последние 50 лет, там происходит фиксация status quo в виде попытки создать универсальный язык обмена СД-моделями (проект XMILE, www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=xmile). В ДС моделировании также не происходит ничего принципиально нового, идет создание более удобных блоков описания процессов, сама же концепция не поменялась с 1960-х гг. 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, происходит интеграция ИМ с новыми технологиями, например, с сервисами геоинформационных систем.

С момента возникновения первых графических инструментов ИМ общего назначения и по сегодняшний день они оставались традиционными desktop-приложениями “старой школы”. 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.

А вот в области выполнения ИМ, управления выполнением и доставки результатов пользователю нас ждут очень интересные изменения (рис. 5). 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 перейдет в браузер. Уже есть попытки в этом направлении, например, www.simul8.com/products/simul8_web, forio.com, а также обзор по инструментам ИМ для инженеров www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/6356/Simulation-in-the-Cloud-is-Becoming-Mainstream.aspx. 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.

Список литературы

1. *Krahl 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.
2. *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.

Борщев Андрей Владиленович *– канд. техн. наук, ген. директор ООО “Компания AnyLogic”*
Контактный телефон (812)441-31-05.
Http://anylogic.com