

ЗАДАЧИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ ИНДУСТРИЯ 4.0 В СФЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА И ЛОГИСТИКИ

Ю.И. Толуев (Магдебург, Рига)

Введение

История возникновения и развития концепции Индустрия 4.0 основана на понятии четвёртой промышленной революции, которая в наше время разворачивается практически во всех индустриально развитых странах. Первая промышленная революция, связанная с появлением оборудования для механического производства, началась во второй половине 18-го столетия. Начиная с 1870-х годов, благодаря электрификации и разделению труда (тейлоризм), назрел переход ко второй промышленной революции (эпоха «нефти, газа, электричества»). Начало третьей промышленной революции, называемой также «цифровой революцией», приходится на 70-е годы прошлого столетия. Четвёртая промышленная революция является наблюдаемым, прогнозируемым и управляемым процессом, суть которого составляет массовое внедрение киберфизических систем в производство, а также в сферу обслуживания различных человеческих потребностей, включая труд, быт и досуг.

Стремление реализовать концепцию Индустрия 4.0 приводит к необходимости использовать возможности современного имитационного моделирования, так как именно оно является эффективным средством исследования новых процессов и испытания новых изделий, устройств и технологий. Вследствие сложности и взаимосвязанности научных и производственных задач, сформулированных в рамках концепции Индустрия 4.0, возникает необходимость применять самые различные виды компьютерного моделирования, независимо от того, принято их называть имитационным моделированием или нет. В качестве эквивалента английского слова *simulation* в современном русском языке применяются варианты: имитационное моделирование, компьютерное моделирование, машинное моделирование, имитация, компьютерная имитация, наконец, симуляция и компьютерная симуляция. В результате традиционное понятие имитационного моделирования, связанное с моделированием процессов, почти утратило свою однозначность, и сообщение о применении имитационного моделирования для решения какой-то конкретной проблемы не может дать представление о том, какой именно вид компьютерного моделирования был применён в данном случае.

Пока нет оснований утверждать, что появление концепции Индустрия 4.0 вызывает необходимость разрабатывать какие-то принципиально новые методы компьютерного моделирования. Скорее, речь идёт о появлении принципиально новых объектов и целей моделирования. Перед тем как формулировать характерные задачи компьютерного моделирования, имеющие отношение к концепции Индустрия 4.0, автор счёл необходимым провести определённую «инвентаризацию» видов компьютерного моделирования, применяемых в области производства и логистики. Можно утверждать, что само существование этих видов моделирования внесло определённый вклад в появление концепции Индустрия 4.0, основой которой являются современные информационные технологии.

1. Сущность концепции Индустрия 4.0

Правительство Германии в 2011 г. провозгласило Industry 4.0 в качестве ключевой составляющей стратегии развития страны в области высоких технологий [1]. Аналогичные программы разрабатываются в США (например, Industrial Internet Consortium) и Японии (Industrial Value-Chain Initiative). Понятие Industry 4.0 основывается на четырех компонентах: киберфизические системы (Cyber-Physical Systems), «Интернет вещей» (Internet of Things), «Интернет услуг» (Internet of Services) и «Умное предприятие» (Smart Factory) [2].

Киберфизические системы (КФС) – это результат интеграции вычислительных и физических процессов. Встроенные компьютеры и сети отслеживают физические процессы и управляют ими, как правило, через обратные связи, при которых физические и вычислительные процессы взаимно влияют друг на друга. В первом поколении КФС используются технологии идентификации, такие как RFID-метки. КФС второго поколения оборудуются датчиками и исполнительными механизмами с ограниченным спектром функций. КФС третьего поколения могут хранить и анализировать данные, оборудуются большим количеством датчиков и исполнительных механизмов и могут подключаться к компьютерным сетям.

«Интернет вещей» позволяет «вещам» и «объектам», таким как RFID, датчики, исполнительные механизмы, мобильные телефоны, используя уникальные схемы адресации, взаимодействовать друг с другом и «сотрудничать» с соседними «умными» компонентами для достижения общей цели. Такие «вещи» и «объекты» могут рассматриваться в качестве киберфизических систем. Таким образом, «Интернет вещей» можно определить как сеть, в которой киберфизические системы взаимодействуют друг с другом через уникальные схемы адресации. Примерами «Интернета вещей» могут служить «Умные дома» (Smart Homes) и «Умные (электрические) сети» (Smart Grids).

«Интернет услуг» (ИУ) позволяет поставщикам услуг предлагать свои услуги через Интернет. В состав ИУ входят участники бизнес-процессов, инфраструктура для оказания услуг, бизнес-модели и собственно услуги. Услуги предлагаются и объединяются в пакеты услуг с добавленной стоимостью различными поставщиками. Поставщики, пользователи и заказчики общаются между собой по различным коммуникационным каналам. В результате возможен новый способ динамического распределения индивидуальной активности по цепочке создания стоимости. Для предприятий появляется возможность предлагать через ИУ не только различные виды продукции, но и имеющиеся у них технологии производства.

Понятие «Умного предприятия» (УП) можно определить как предприятие, на котором киберфизические системы общаются через «Интернет вещей» и помогают людям и механизмам выполнять свои задачи с использованием контекстного (ситуативного) знания, имеющегося на предприятии. Технические средства «Умного предприятия» работают на основе информации, поступающей как из физического, так и виртуального мира. Информация из физического мира – это, например, положение или состояние инструмента и оборудования, а информацией из виртуального мира могут быть электронные документы, чертежи или целые имитационные модели.

В рамках развития концепций Industry 4.0 в области производства и логистики следует ожидать появление множества объектов, к которым относится расширенное понятие «умный» (Smart). На этих объектах будут установлены электронные блоки, с помощью которых объекты будут «знать» своё назначение в производственном или логистическом процессе, контролировать своё текущее состояние и поддерживать коммуникации с другими «умными» объектами, а также с соответствующими системами управления. «Умными» в этом смысле станут различные виды изделий, грузов, товаров и носителей грузов (например, тара и упаковка). Также и люди, выступающие в роли клиентов или пассажиров, будут снабжены соответствующими устройствами, в том числе, на базе средств мобильной связи. Разумеется, средства выполнения операций в логистических системах (складское и подъемно-транспортное оборудование, технические средства всех традиционных видов транспорта) будут оснащены «умными» модулями, с помощью которых они будут взаимодействовать как с обслуживаемыми логистическими объектами (грузами, пассажирами и т.п.), так и с системами управления. Дальнейшее развитие в области производства и логистики получат информационные технологии, такие как RFID, Indoor Navigation, Global Positioning, Tracking & Tracing, WiFi, Bluetooth-Beacons, Virtual Reality, Augmented Reality, Big Data, Cloud Computing и др.

2. Виды моделирования, применяемые в области производства и логистики

Компьютерные модели применяются сегодня практически во всех областях науки, техники, экономики и промышленности. В предлагаемом обзоре автор ограничивается областью производства и логистики, так как именно в этой области ожидаются наибольшие изменения, связанные с реализацией концепции Индустрия 4.0, причём эти изменения будут проявляться на всех уровнях функционирования реальных систем: от способов организации бизнес-процессов до способов выполнения конкретных технологических операций. Известно, что самые совершенные компьютерные модели применяются сегодня, например, в промышленных и транспортных тренажёрах, в индустрии компьютерных игр и в киноиндустрии. Существуют модели процессов, развивающихся в человеческом обществе: от динамики распространения эпидемических заболеваний до схем функционирования коррупционных сообществ. Все эти (как и многие другие) области применения компьютерных моделей останутся за рамками предлагаемого обзора, так как к реализации концепции Индустрия 4.0 они имеют лишь очень опосредованное отношение.

Отдельно надо сказать о смысле совместного использования понятий производства и логистики. Очевидным является факт, что современное производство просто не может существовать без эффективного логистического обеспечения. Производственное предприятие не может функционировать, если не решены задачи его внешней логистики: логистики снабжения и логистики сбыта. Процессы хранения и перемещения средств и предметов труда на территории предприятия относятся к его внутренней логистике. Можно утверждать, что в условиях традиционного дискретного производства (например, на предприятиях машиностроения) предметы труда (сырьё, полуфабрикаты, изделия и т.п.) более 90% времени находятся не в состоянии «технологического передела», а в состоянии «логистического хранения или перемещения». Концепция Индустрия 4.0 предусматривает не только гибкие и эффективные способы изготовления индивидуально заказанных единиц продукции, но и максимально точное выполнение обещанных сроков поставки этой продукции потребителям.

2.1. Логические модели процессов

Акцент на понятии «логические модели» сделан с целью подчеркнуть, что основная задача данного класса моделей заключается в том, чтобы показать смысл (логику развития и результаты) процесса, который наблюдается в моделируемой системе. Возможности визуализации моделируемого процесса, связанные с использованием графических моделей объектов, будут рассмотрены ниже.

Рассматриваемые виды моделирования привязаны к уровням иерархии процессов, существующих в реальной экономике и промышленности, и их рассмотрение организовано по принципу «сверху вниз».

Модели мировой экономики по отраслям. Попытка создать достаточно адекватную модель всей мировой экономики является малоперспективной, хотя такие попытки регулярно делаются. Значительно адекватнее и полезнее выглядят модели развития процессов добычи и реализации на мировых рынках полезных ископаемых, например, нефти, газа, угля, руд металлов. Аналогичным образом строятся модели производства и реализации чёрных и цветных металлов, минеральных удобрений, продукции сельского хозяйства. Делаются попытки оценить с помощью моделей перспективы развития транспортных процессов в рамках глобальной логистики, например, железнодорожных или морских перевозок. Интерес при этом представляют, прежде всего, не «чисто прогнозные» модели, а динамические модели, основанные на принципах системной динамики.

Модели народного хозяйства страны по отраслям. Этот случай аналогичен предыдущему. Как правило, исследователи концентрируются на отраслях, наиболее сильно влияющих

на уровень национального дохода страны, или на производстве продукции, занимающей значительное место в структуре импорта. Известны также модели, посвящённые конкретным видам сельского хозяйства, например, мясному животноводству. Доминирующим методом моделирования здесь также является системная динамика, хотя и агентное моделирование может часто рассматриваться как перспективная альтернатива [3].

Модели бизнес-процесса предприятия в целом или отдельных направлений его деятельности. Здесь также имеются в виду динамические модели, в которых использованы принципы системной динамики или агентного моделирования. Особый интерес в этой группе моделей представляют модели цепей поставок, в которых рассматриваются стратегии поведения нескольких предприятий, связанных между собой общим бизнес-процессом.

На этом месте обзора следует дать определение логистическому уровню построения моделей и обозначить группу моделей, которые соответствуют этому уровню. Построить модель на логистическом уровне означает, что суть создаваемого процесса моделирования заключается в отображении движения во времени и пространстве потоков дискретных объектов, которые аналогичны объектам, наблюдаемым в реальной действительности. Модели логистического уровня называют также моделями материальных потоков. Конечно, в силе остаются представления, что на абстрактном (концептуальном) уровне такие модели часто можно изображать в виде систем массового обслуживания, а при их реализации на компьютере применяются парадигмы «дискретные события» и «агентное моделирование» [4]. Описанные выше три группы моделей не относятся к логистическим, так как в них, как правило, не рассматривается движение отдельных объектов (деталей, изделий, товаров, единиц груза, пассажиров, транспортных средств и т.п.), а лишь математически рассчитывается их количество в определённые моменты времени в определённых точках пространства. Подробные кинематические модели, например, отображающие процесс перемещения и обработки детали на станке-автомате или движения промышленного робота, также уже не относятся к логистическим, так как в таких моделях в центре внимания находится процесс обработки одного объекта, а не потоков таких объектов. Кроме того, при моделировании чисто логистических операций (хранение, транспортировка, упаковка, перевалка и т.п.) не отображается изменение физических или химических свойств объектов (предметов труда), как это происходит в моделях более низкого уровня.

Модели транспортных систем и сетей. Такие модели относятся к классу логистических, если в них отображается движение отдельных единиц транспорта: автомобилей, поездов, судов, самолётов и т.п. Иногда такие системы моделируют также на макроуровне с применением методов системной динамики, но в этом случае модели уже не следует называть логистическими. Отдельную группу моделей этого вида составляют очень широко распространённые модели дорожного движения, которые в форме микроскопических моделей можно отнести к классу логистических.

Модели производственных и логистических процессов на предприятии. Как было сказано выше, практически все виды движения средств и предметов труда на складах и производственных участках предприятия можно отобразить с помощью дискретно-событийных моделей внутрипроизводственной логистики. Разумеется, это утверждение относится не только к чисто производственным предприятиям, но и предприятиям торговли, логистическим центрам, грузовым и пассажирским терминалам. Моделирование процессов внешней логистики предприятия сводится к моделированию входных и выходных потоков транспортных средств и перевозимых ими грузов. Модели на логистическом уровне создаются также для как угодно сложных цепей поставок [5].

Модели технологических процессов. Если на рабочем месте выполняются только операции сборки или разборки изделий или учитывать надо только общую длительность операции, приходящуюся на одно изделие, то такое рабочее место может быть включено

в состав логистической модели, описанной выше. В других же случаях в моделях технологических процессов на как угодно высоком уровне детализации могут отображаться последовательности операций на конкретных этапах обработки изделия. Многообразие таких операций является практически безграничным, так как они могут относиться к любым отраслям промышленности и типам производственных процессов. Очень часто детальная модель технологического процесса сразу разрабатывается как анимационная 3D-модель.

2.2. Графические модели объектов и процессов

Основой данного класса моделей являются двумерные (2D) или трёхмерные (3D) модели средств и предметов труда, используемых в производственных и логистических системах. Первоначально каждая модель разрабатывается как статическая (неподвижная) модель, а в дальнейшем ей могут быть приданы свойства автономного движения (например, в виде поворота в 2D- или 3D-пространстве) или она будет включена в состав анимационной модели, суть которой заключается в динамическом взаимодействии нескольких графических объектов. Анимационные модели могут быть как независимыми от рассмотренных выше моделей процессов, т.е. создаваться человеком в виде обычного мультипликационного фильма, так и применяться в качестве средства отображения того, что происходит в течение конкретного прогона модели процесса. В последнем случае анимационная модель может работать в режиме онлайн одновременно с моделью процесса или в режиме офлайн, когда протокол событий, происшедших в модели процесса, сохраняется в виде отдельного файла. Анимационные модели почти никогда не применяются совместно с абстрактными моделями процессов, созданными в форме моделей системной динамики. В рамках всех остальных отмеченных выше видов моделирования процессов анимационные модели в той или иной форме применяются регулярно.

Следует заметить, что 2D-модели применяются достаточно часто именно в моделях логистического типа, так как во многих пакетах имитационного моделирования такие модели генерируются полностью автоматически или они могут быть созданы с минимальными затратами труда программиста. Кроме того, 2D-модели часто оказываются вполне информативными с точки зрения возможностей понимания и анализа транспортных и производственных процессов, воспроизводимых базовой моделью. Специальной формой применения 2D-моделей является абстрактная визуализация состояния и поведения (например, в виде «облаков», изменяющих свои форму и цвет) большого числа объектов в моделях, в которых используется принцип агентного моделирования.

Мир 3D-моделирования характеризуется очень большим разнообразием. Практически, с помощью всех современных систем автоматизированного проектирования типа CAD/CAM/CAE можно создавать 3D-модели деталей и конструкций, которые могут являться составными частями как производимой продукции, так и оборудования, используемого при её производстве.

Существует большое число программных пакетов, в которых имеется возможность использовать встроенные или собственные библиотеки 3D-объектов для создания пространственных моделей складов, производственных участков и цехов, транспортных терминалов, а также других производственных и логистических систем. Почти фотореалистическая 3D-графика может быть использована при работе с пакетами, предназначенными для моделирования систем дорожного движения. Во всех этих случаях 3D-графика может быть динамической, т.е. результатом её применения являются анимационные фильмы, подчас по достоверности изображения лишь очень незначительно отличающиеся от видео- или кинофильмов.

Важное место в мире компьютерного моделирования занимают сегодня модели виртуальной реальности (VR-модели). В таких моделях объекты ведут себя близко к поведению аналогичных объектов материальной реальности. Пользователь может не только наблюдать эти объекты, но и ощущать их с помощью осязания и воздействовать на них в

согласии с реальными законами физики. VR-модели широко применяются сегодня, например, в качестве заменителей сложных технических агрегатов в процессе обучения персонала, который будет производить их обслуживание и ремонт.

Относительно новым классом 3D-моделей являются модели дополненной реальности, так называемые AR-модели (от английского Augmented Reality). В таких моделях пользователь может наблюдать виртуальный 3D-объект в реальной физической среде. AR-модели применяются, например, в качестве ассистента для рабочего, выполняющего электромонтажные работы, или работника склада, совершающего движение в его пространстве при комплектации заказа.

В форме весьма точных 3D-моделей создаются самые различные кинематические модели: пространственные модели технологических операций, выполняемых рабочими или роботами, или модели процессов перемещения крупных объектов на производственных площадках (например, фюзеляжа самолёта, корпуса судна и т.п.). К специальным 3D-моделям относятся модели типа Digital Mock-Up, применяемые для анализа взаимного пространственного расположения компонентов узла или готового изделия, например, с целью проверки реализуемости сборочных или ремонтных операций. Известны также 3D-модели изменения геометрии изделий при выполнении технологических операций (например, при прессовке деталей кузова из жести) и 3D-модели типа Crashtest (например, для изучения последствий удара изделия о препятствие).

3. Новые виды моделей и процессов, связанных с реализацией концепции Индустрия 4.0

Концепция цифрового производства (e-Manufacturing) вполне чётко была сформулирована около 15 лет назад [6], и она в большей степени касалась процессов, протекающих на одном конкретном предприятии, в то время как концепция Индустрия 4.0 предусматривает обширную горизонтальную интеграцию участников самых разных бизнес-процессов.

Всю концепцию Индустрия 4.0 можно рассматривать как планируемые преобразования в производстве и бизнесе, предпосылки для которых возникли на самом низком, т.е. техническом и технологическом уровне, и прежде всего, в области систем сбора, хранения, передачи и обработки данных. На базе использования большого числа компактных и интеллектуальных электронных модулей возникают принципиально новые возможности для организации процессов на всех рассмотренных выше уровнях реальной экономики и промышленности, но теперь рассмотрение этих возможностей и связанных с ними задач моделирования будет проведено в направлении «снизу вверх».

Интенсивные работы в области компьютерного моделирования связаны сегодня с проектированием, вводом в эксплуатацию и сопровождением в течение процесса эксплуатации станков, оборудования и промышленных установок различной сложности и размера. Основой для таких работ являются успехи, достигнутые в области рассмотренного выше графического 3D-моделирования. Утвердилось мнение, что правильно сделанная 3D-модель должна привести к уменьшению количества ошибок уже на стадии конструкторской разработки сложного оборудования. Так как такие 3D-модели являются, как правило, интерактивными и динамическими, возникает возможность детально воспроизвести и изучить процессы выполнения конкретных технологических операций с изделиями различного типа.

Популярным стал класс 3D-моделей с названием «цифровой двойник» (иногда применяется также термин «цифровой близнец»; оба – от англ. Digital Twin). Главной особенностью цифрового двойника является возможность подключить его к физическому оригиналу путём передачи данных от множества установленных на нём датчиков и других «умных» устройств. В результате цифровой двойник «живёт» параллельно с оригиналом и может применяться, например, для диагностики и прогнозирования отказов или комплексной оптимизации процесса эксплуатации сложного оборудования, каковым может являться оригинал [7].

Многие работы по моделированию, имеющие отношение к концепции Индустрия 4.0, основаны на идее объединения цифрового мира с реальным. Модели типа «цифровой двойник» являются одной из форм такого объединения. Понятие «моделирование в реальном (масштабе) времени» уже давно существует в области моделирования технических устройств в механике, электротехнике, мехатронике и т.п., например, с использованием пакета MATLAB/Simulink. Сегодня наблюдается тенденция к применению этого термина также и к описанным выше «большим» 3D-моделям, хотя разработчики моделей вкладывают в этот термин пока ещё весьма различный смысл.

Очень ясная связь между цифровой моделью и реальными системами управления наблюдается в области моделирования процессов на логистическом уровне, когда применяется подход с названием «эмуляция». Это понятие хорошо знакомо специалистам, занимающимся разработкой и тестированием программного обеспечения, предназначенного для управления техническими системами, например, отдельными роботами или целыми автоматизированными складскими комплексами. Суть эмуляции в таких случаях её применения заключается в том, что объект управления заменяется компьютерной (имитационной) моделью, которая взаимодействует с реальными управляющими программами. Модель имеет в своём составе сенсорную часть, откуда посылаются сигналы от различных «датчиков и счетчиков», соответствующих устройствам реальной системы. Управляющие программы обрабатывают эти сигналы и вырабатывают команды управления, которые воспринимаются исполнительной частью модели. Модель адекватно реагирует на команды управления, т.е. в ней происходят такие же изменения, какие должны происходить в реальной системе. Пример с подробным описанием опыта применения эмуляции при отладке программного обеспечения для управления сложной конвейерной системой в зоне комплектации большого склада содержится в работе [8].

В процессе реализации концепции Индустрия 4.0 ожидается появление принципиально новых схем бизнес-процессов, направленных на реализацию идеи «массового производства по индивидуальным заказам». В концепции Индустрия 4.0 предусматриваются новые формы горизонтальной интеграции участников производственно-логистического процесса на уровне предприятий и новые формы вертикальной интеграции, обеспечивающие быструю трансформацию внешних заказов предприятия в конкретные производственные задания для его отдельных цехов и участков. Вся логистика цепей поставок должна изменить свою философию: от заключения долговременных «надёжных и оптимальных» договоров участники логистического процесса должны перейти к быстрым, гибким и экономически эффективным способам обработки потоков заявок на перевозки в реальном масштабе времени. Уровни запасов на складах могут быть существенно уменьшены, так как всё больше товаров будет производиться по заказам покупателей и доставляться к ним в кратчайшие сроки. Вполне понятно, что подобная скорость и гибкость процессов может быть обеспечена только полной информационной прозрачностью участвующих в них производственных и логистических предприятий. «Информационный двойник» каждого предприятия должен регулярно принимать сообщения о его текущем состоянии и предоставлять информацию о производственных возможностях предприятия другим участникам бизнес-процесса в реальном масштабе времени.

Простой гипотетический пример должен пояснить особенности процесса приобретения товара путём его заказа в Интернете в условиях, соответствующих реализованной концепции Индустрия 4.0.

Клиент желает завтра около 19:00 прийти на день рождения к другу и подарить ему авторучку зелёного цвета с красной пастой, у которой на металлическом колпачке стального цвета с помощью лазера должна быть выполнена рукописным шрифтом гравировка «Пете от Васи». К другу он пойдёт прямо с работы, поэтому товар надо доставить в его рабочий офис не позднее 18:30. Клиент находит в Интернете онлайн-магазин, который готов попытаться

выполнить его заказ. После ввода спецификации требуемого товара магазин берёт несколько секунд на её обработку, после чего проводит с клиентом короткий диалог. Магазин сообщает, что до 18:30 курьер не сможет появиться по указанному адресу, но с помощью беспилотного летательного аппарата (дрона) товар может быть доставлен в интервале времени с 18:20 до 18:30. Клиент должен выбрать одну из предлагаемых остановок общественного транспорта, на которой он будет ожидать появления летательного аппарата, доставляющего товар.

Реальная последовательность действий магазина при приёме и выполнении заказа остаётся скрытой от клиента. В действительности, магазин является лишь «интегратором», т.е. в его распоряжении вообще нет никаких товаров, и при решении вопроса о выполнимости заказа в течение нескольких секунд он проводит «электронные переговоры», по крайней мере, с двумя типами партнёров: с потенциальными поставщиками товара и службами доставки отправок (различными курьерскими и почтовыми службами) в городе А, где проживает клиент. Узнав о том, что данный товар отсутствует у потенциальных поставщиков в городе А, магазин опрашивает поставщиков в других городах, имеющих авиационное сообщение с городом А. Зная, что выбранной службе доставки отправок в городе А для доставки товара нужно, как минимум, два часа после момента прибытия самолёта, во внимание принимаются только те города поставщиков, самолёты из которых прибывают в город А не позднее 16:30. Выбирается город В, в окрестностях которого есть предприятие-поставщик (оптовый склад или другая фирма, занимающаяся рассылкой товаров по заказам), готовое скомплектовать заказанную авторучку и сделать на ней гравировку. Это предприятие связывается с местной службой доставки отправок и получает подтверждение, что они успеют погрузить товар на нужный самолёт. Вполне возможно, что на момент проведения «переговоров» у поставщика нет колпачков стального цвета, но у него есть информация от завода-изготовителя, что именно завтра около 7 часов утра в составе очередной запланированной поставки такие колпачки появятся. Наконец, служба доставки товаров в городе А, имеющая в своём распоряжении два специальных автомобиля, двух курьеров-велосипедистов и один дрон, сообщила магазину, что «на последней миле» она будет транспортировать товар с помощью дрона, так как в части города, где расположен офис клиента, проводится ремонт дорожного покрытия и в выбранное для поставки время суток там обязательно будут образовываться заторы. Кроме того, на послеобеденное время прогнозируется сильный дождь, вследствие чего будет «негуманно» поручить доставку велосипедисту.

Заключение

Приведённый пример показывает, что в новых бизнес-процессах реального времени нельзя игнорировать никакие «мелочи», так как даже одно звено процесса, не способное предоставить партнёрам достоверную информацию в нужный момент времени, может разрушить этот процесс. С помощью имитационного моделирования могут решаться задачи проверки реализуемости подобных процессов в двух аспектах: а) могут ли быть проведены все необходимые «переговоры» между участниками процесса в приемлемые сроки, т.е. в течение нескольких (десятков) секунд, и б) могут ли быть осуществлены с достаточно высокой вероятностью физические процессы, связанные с производством соответствующих товаров и услуг, с соблюдением запланированных сроков. Ясно, что на многих этапах таких процессов проявляется действие случайных факторов, что можно сравнительно легко учесть при моделировании. Уже даже применение метода Монте-Карло при расчёте соответствующих длительностей операций и сроков наступления контрольных событий может существенно повысить надёжность принимаемых решений.

Литература

1. **Kagermann H., Wahlster W., Helbig J., eds.** Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. 8. April 2013.
2. **Hermann M., Pentek T., Otto V.** Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. Technische Universität Dortmund, Working Paper, January 2015. (перевод: http://www.msbfond.ru/about/treatment/tak_chno_zhe_takoe_industry_4_0/).
3. **Борщёв А.В.** От системной динамики и традиционного имитационного моделирования – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты [Электронный ресурс]. <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf>.
4. **Карпов Ю.Г.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование на AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
5. **Толуев Ю.И.** Методы имитационного моделирования цепей поставок // Логистика и управление цепями поставок, 2016, №4. С. 8–15.
6. **Толуев Ю.И., Рихтер К.** Комплексное применение имитационного моделирования при реализации концепции e-Manufacturing // Сборник докладов первой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2003). Том 1, с. 23–27.
7. **Шустиков В.** Цифровой двойник (Digital Twin) – элемент, которого так не хватало! [Электронный ресурс]. http://sk.ru/news/b/pressreleases/archive/2017/06/23/cifrovoy-dvoynik_2800_digital-twin_2900_1320_-element-kotorogo-tak-ne-hvatalo_2100_.aspx.
8. **Spieckermann S., Stauber S., Bleifuß R.** A Case Study on Simulation and Emulation of a New Case Picking System for a US Based Wholesaler // Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. P. 1490–1501.