

СТАНДАРТНЫЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ю.И. Толуев (Магдебург, Рига)

Введение

Этапы создания и применения имитационных моделей весьма подробно были описаны в классической книге Р. Шеннона еще в 1975 году (на русском языке эта книга была издана в 1978 году) [1]. В разделе «Процесс имитации» автор определяет 11 этапов, которые начинаются с определения границ исследуемой системы и завершаются документированием хода осуществления имитационного проекта и полученных результатов моделирования. Аналогичная методика излагается авторами А.М. Лоу и В.Д. Кельтоном [2] в разделе «Этапы в исследовании системы посредством моделирования». В стандартном учебнике по имитационному моделированию Б.Я. Советова и С.А. Яковлева [3] множество подэтапов объединены в три основных этапа: построение концептуальной модели системы и ее формализация; алгоритмизация модели и ее машинная реализация; получение и интерпретация результатов моделирования системы.

Целью данной статьи является демонстрация варианта интерпретации описанного в [1], [2] и [3] общего подхода к организации имитационного исследования применительно к конкретной предметной области, а именно к области моделирования производственных и логистических систем, в которой за два последних десятилетия на профессиональном уровне были созданы тысячи полноценных и полезных моделей [4]. Предлагаемый вариант детализации этапов создания моделей основывается на учете как технических, экономических и организационных особенностей объектов моделирования, так и математических, информационных и программно-технических характеристик создаваемых для этих объектов моделей. Общая структура предлагаемой методики отличается от той, что описывается в [3], лишь тем, что в ее состав введен этап предварительной оценки реализуемости имитационного проекта.

Стандартными данные этапы можно называть потому, что они основаны на традициях, которые сложились как в теории, так и в практике имитационного моделирования производственных и логистических систем. Так как в литературе (см. выше) эти этапы описаны лишь на принципиальном уровне, разработчикам моделей часто приходится самостоятельно находить ответы на конкретные вопросы, содержание которых может быть отображенено в одной или нескольких позициях диаграмм, приведенных в данной работе.

Применение схем мозгового штурма

Схема мозгового штурма является одним из типов диаграмм, создание которых поддерживается, например, в среде MSVisio. Выбор такой «нечеткой» формы описания процесса создания имитационных моделей объясняется его творческим характером, который не может быть подчинен строгим инструкциям. В представленных на рис. 1–6 диаграммах на первом месте стоит не последовательность выполняемых шагов или связанных с этими шагами понятий, проблем и действий, а сам факт их учета в ходе реализации соответствующих этапов создания модели. Диаграммы не указывают разработчику модели, что именно и в каком порядке он обязательно **должен делать**, а предлагают набор ключевых понятий, проблем и действий, о которых он обязательно **должен подумать**, работая над имитационным проектом.

Представленные диаграммы не являются «догмой», то есть другой автор мог бы включить в них другие наборы позиций или обозначить другие связи между позициями данных диаграмм, но уже и в таком виде они имеют право на существование, так как основаны на большом практическом опыте разработки имитационных моделей производственных и логистических систем (см., например, [5] и [6]). Предлагаемая методика может

Пленарные доклады

быть применена при разработке как моделей системной динамики [5], так и дискретно-событийных моделей [6]. Особенностью диаграмм является, с одной стороны, повторение одних и тех же позиций в разных диаграммах, а с другой – использование слова «другие» в списках позиций, которые очевидно могут быть продолжены. Первая особенность объясняется тем фактом, что разработчик модели, на самом деле, повторно обращается к некоторым свойствам модели на разных этапах ее создания. Вторая особенность связана с тем, что перечисление всех – общеизвестных или специфических для конкретного проекта – вариантов такой позиции приведет к недопустимому увеличению размеров диаграммы, которая должна быть показана в данной работе в виде рисунка.

Приведенные ниже комментарии к отдельным этапам являются очень краткими и в них, конечно, не могут быть даны описания всех позиций диаграмм или связей между этими позициями. Но такую работу автор уже проделал и представил ее результаты в форме главы книги, посвященной моделированию производственных и логистических систем, которую он мечтает однажды дописать до конца.

Этап 1: Оценка реализуемости имитационного проекта

Данный этап (рис. 1) выполняется, как правило, при тесном взаимодействии разработчика модели с заказчиком, и по его завершении (при условии принятия положительного решения о необходимости разработки модели) составляется документ, являющийся официальным заданием на разработку модели.

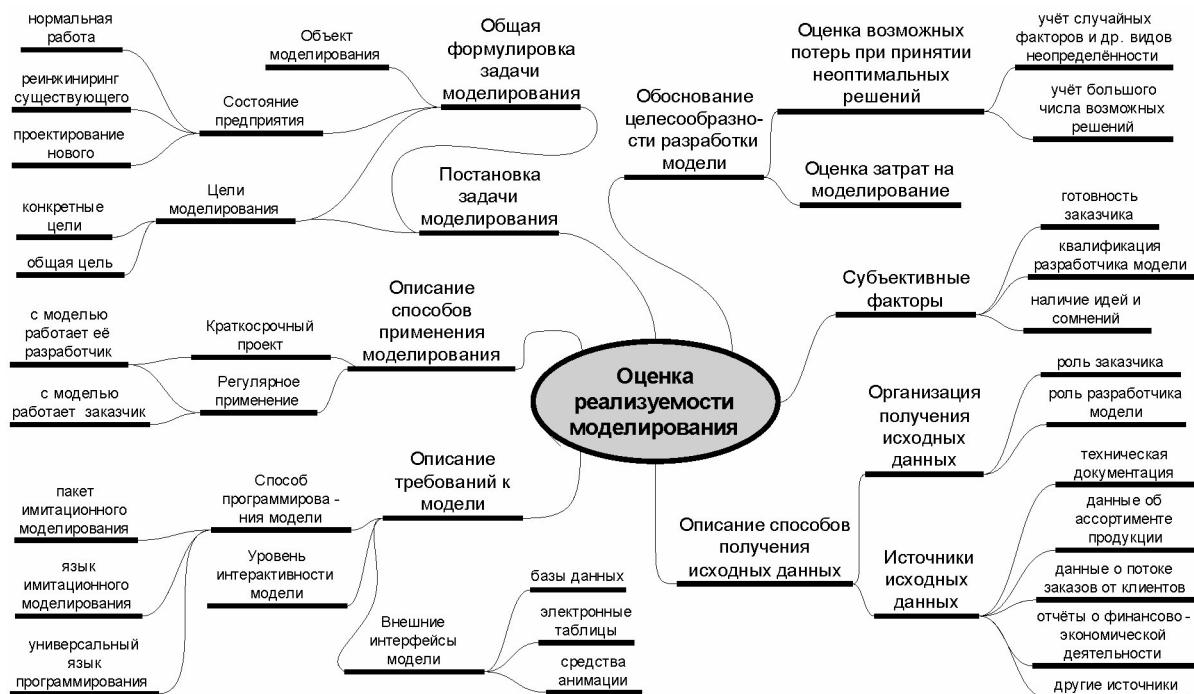


Рис. 1. Элементы этапа «Оценка реализуемости моделирования»

Следующие элементы этапа особенно подробно согласовываются между участниками проекта: постановка задачи моделирования, обоснование целесообразности разработки модели, описание способов применения модели и организация получения исходных данных.

В рамках общей формулировки задачи моделирования подробно описывается *состояние*, в котором находится предполагаемый объект моделирования (существующее или проектируемое производственное или логистическое предприятие), и поясняются

Пленарные доклады

причины (мотивы) возникновения идеи проведения имитационного исследования (англ.: *simulationstudy*). Далее уточняются как общие, так и конкретные цели проведения такого исследования. Оцениваются примерные затраты на разработку модели, и на основе принципа «стоимость–эффективность» формируется мнение о потенциальной «рентабельности» модели. При этом заказчик должен по возможности ясно представлять себе способ применения готовой модели: кто именно и как часто будет с этой моделью работать и какие задачи он будет при этом решать. Вопрос доступности исходных данных часто оказывается решающим в судьбе имитационного проекта: специалист отказывается разрабатывать модель, если не видит гарантий получения от заказчика требуемого объема исходных данных. Это относится как к постоянным или условно-постоянным данным, необходимым на этапе построения модели, так и к переменным данным, на основании которых формируются исследуемые варианты организации системы и протекающих в ней процессов.

Сильное влияние на решение о разработке модели оказывают и *субъективные факторы*: заказчик может отказаться от планов поручить эту работу конкретному исполнителю, если у него будут возникать сомнения в уровне квалификации и «профессиональной честности» последнего. Также и сам исполнитель может отказаться от предложенного проекта, если почувствует, что не сможет выполнить все явно завышенные ожидания заказчика, в частности, в отношении сроков выполнения имитационного проекта.

Этап 2: Разработка концептуальной модели

Концептуальная и формальная модели в совокупности представляют собой подробную спецификацию, на основании которой выполняется программирование модели, то есть ее программно-техническая реализация с помощью пакета имитационного моделирования (ПИМ) или других средств программирования. При этом *концептуальная модель* поясняет, что именно должна отображать компьютерная модель, а *формальная модель* описывает математические приемы, которые должны быть применены при построении этой компьютерной модели. Иногда, при заранее известном решении о выборе парадигмы моделирования (непрерывный или дискретно-событийный подход) и сравнительно несложных математических схемах, применяемых в модели, этап разработки формальной модели не выделяется в качестве отдельного, а сама формальная модель рассматривается как составная часть концептуальной модели.

Особенностью концептуальной модели (рис. 2) является то, что в отличие от формальной модели ее еще можно и нужно показывать заказчику, который не обязан располагать знаниями в области имитационного моделирования и математической статистики. При изображении элементов концептуальной модели, наряду с текстом и таблицами, применяются обычные графические формы (структурные схемы, схемы материальных потоков, блок-схемы алгоритмов, эскизы, рисунки и т.п.), позволяющие объяснить заказчику основные свойства (прежде всего, структуру) создаваемой модели и получить от него ответы на конкретные вопросы, относящиеся к элементам модели.

В рамках концептуальной модели поясняется пространственное расположение системы (например, производственный участок, цех, склад, предприятие в целом, цепь поставок, транспортный канал, перевалочный пункт и т.п.), описываются основные производственные и транспортные процессы, реализуемые внутри системы, перечисляются основные технические ресурсы и формулируются задачи управления, связанные, в частности, с управлением потоками и распределением ресурсов при реализации производственных и транспортных процессов. Моделируемая система представляется в виде *сетевой структуры*, узлы (элементы) которой являются ее выделенными подсистемами, а связи между узлами указывают на существование соответствующих потоков внутри системы.

Пленарные доклады

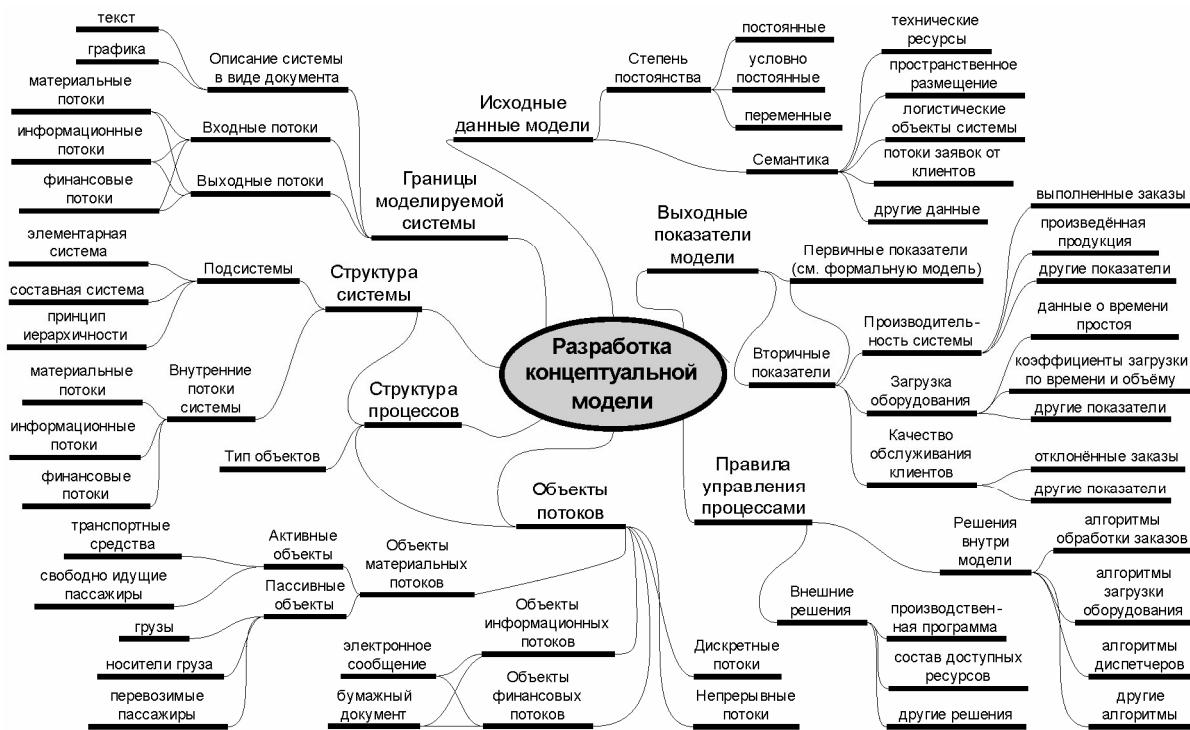


Рис. 2. Элементы этапа «Разработка концептуальной модели»

Взаимодействие системы с внешней средой представляется в виде ее *входных и выходных потоков*, в которых переносится материальный, информационный или финансовый субстрат. Основным типом потоков в производственных и логистических системах являются *материальные потоки*. Действительно *непрерывными* потоками в производственных системах могут быть только материальные потоки, а точнее, физические потоки материалов, которые являются жидкостями, газами или сыпучими материалами. Все остальные материальные, информационные и финансовые потоки являются *дискретными*, то есть они могут быть представлены как последовательности событий, каждое из которых означает появление в заданной точке пространства (в так называемой точке наблюдения за потоком) одного или нескольких объектов. Описать *структуру потока* означает составить классификацию типов объектов, перемещаемых внутри этого потока.

Выходные показатели процесса функционирования системы, оцениваемые с помощью модели, по способу получения можно разделить на первичные (измеряемые) и вторичные (вычисляемые). *Первичные показатели* являются стандартными или специально заданными разработчиком модели переменными моделирующей программы, значения которых всегда могут быть зафиксированы и использованы при анализе результатов моделирования. *Вторичные показатели* вычисляются на базе первичных в ходе выполнения прогона модели или после его завершения путем использования заданных разработчиком модели формул или процедур. На этапе разработки концептуальной модели, как правило, подлежат определению только вторичные показатели, которые специально конструируют и согласовывают с пользователем модели (заказчиком) с той целью, чтобы он мог адекватно оценивать характеристики процессов функционирования системы, воспроизводимых моделью.

Этап 3: Разработка формальной модели

Известно, что имитационные модели процессов, наблюдаемых в производственных и логистических системах, являются динамическими моделями и для их построения используются две основные парадигмы: метод *системной динамики* по Форрестеру и *дискретно-событийный подход* [4]. Довольно часто принципиально возможным является применение обоих подходов к моделированию конкретной системы, но по степени сложности и функциональным возможностям такие модели будут существенно отличаться друг от друга, поэтому от решения вопроса о выборе *парадигмы моделирования* может зависеть успех всего имитационного проекта.

В случае построения системно-динамической модели на этапе ее математической формализации (рис. 3) строятся, как правило, эскизы так называемых «потоковых диаграмм» и «диаграмм влияния», то есть двух сетевых структур, одна из которых отображает процессы движения и накопления материальных, информационных и финансовых потоков, а вторая – процессы управления этими потоками. Сами «формулы» на этом этапе подробно не расписываются, так как делать это бывает удобнее и целесообразнее на этапе создания исполняемой модели при работе в среде конкретного ПИМ. Отдельные потоковые диаграммы соответствуют, как правило, подсистемам, выделенным на этапе построения концептуальной модели.



Рис. 3. Элементы этапа «Разработка формальной модели»

Для дискретно-событийной модели в рамках формальной модели (рис. 3) с использованием подходящих графических форм предлагается построить структуры трех типов:

структуре системы, разделенную на подсистемы, для каждой из которых определены основные элементы собственной структуры;

структуре процессов, в которой в виде блок-схем отображаются последовательности относящихся к объектам потоков операций типа «создать», «уничтожить», «задер-

Пленарные доклады

жать», «продвинуть», «обработать», «загрузить», «выгрузить», «объединить», «разделить» и т.п.;

структурные схемы алгоритмов управления, предназначенных для решения задач управления потоками и распределения ресурсов.

При построении относительно больших моделей рекомендуется использовать стандартные способы изображения диаграмм, например, в соответствии с нормами IDEF0, UML или Aris.

В принципе, имитационная модель производственной или логистической системы может быть создана как чисто *детерминированная модель*, в которой не предусматривается учет влияния *случайных факторов* на моделируемые процессы. Но на практике в большинстве моделей – с целью повышения адекватности отображения реальной действительности – такое влияние стараются учесть путем объявления случайными некоторых событий, длительностей интервалов времени или значений атрибутов объектов потоков. В рамках формальной модели конструируются конкретные процедуры генерирования всех типов случайных воздействий модели.

Этап 4: Построение исполняемой модели

Основным содержанием этапа построения исполняемой модели (рис. 4) является реализация всех разработанных в рамках концептуальной и формальной моделей структур, схем и алгоритмов с помощью выбранных средств программной реализации модели. Данный этап разработки модели иногда называют также *программированием модели*, но говорить именно о *построении исполняемой модели* представляется более правильным, так как во многих случаях модели собираются из готовых программных блоков, исходные тексты которых или вообще не доступны разработчику модели, или модифицируются им крайне редко. Это значит, что основная структура исследуемой системы, состоящая из статических элементов и связывающих их потоков, часто может быть отображена в компьютерной модели без написания *программного кода*. Однако «настоящее программирование» приходится применять для реализации требуемых алгоритмов управления процессами в модели, а также процедур сбора первичных и расчета вторичных данных с результатами моделирования.

Можно утверждать, что все показанные на рис. 4 *пакеты имитационного моделирования* являются в принципе пригодными для решения задач моделирования процессов в производственных и логистических системах, так как именно для решения таких задач они и были созданы. ПИМ для системно-динамического моделирования вообще очень незначительно отличаются друг от друга, так как сама идея этого вида моделирования связана с использованием лишь четырех типов структурных элементов моделей: управляемых потоков, накопителей, управляющих переменных и управляющих связей. ПИМ для дискретно-событийного моделирования характеризуются большим многообразием в плане средств представления структуры модели, но в конечном итоге любую задачу создания модели данного типа можно успешно решить с помощью любого из показанных на рис. 4 коммерческих пакетов.

Этап построения исполняемой модели обычно завершаются проведением ее верификации и валидации. Известны определения: с помощью верификации получают ответ на вопрос «правильно ли мы построили модель?», а с помощью валидации – на вопрос «правильную ли мы построили модель?». Оба этих вида деятельности можно объединить понятием «проверка модели». Непроверенную модель нельзя применять для проведения рабочих имитационных экспериментов.

Пленарные доклады

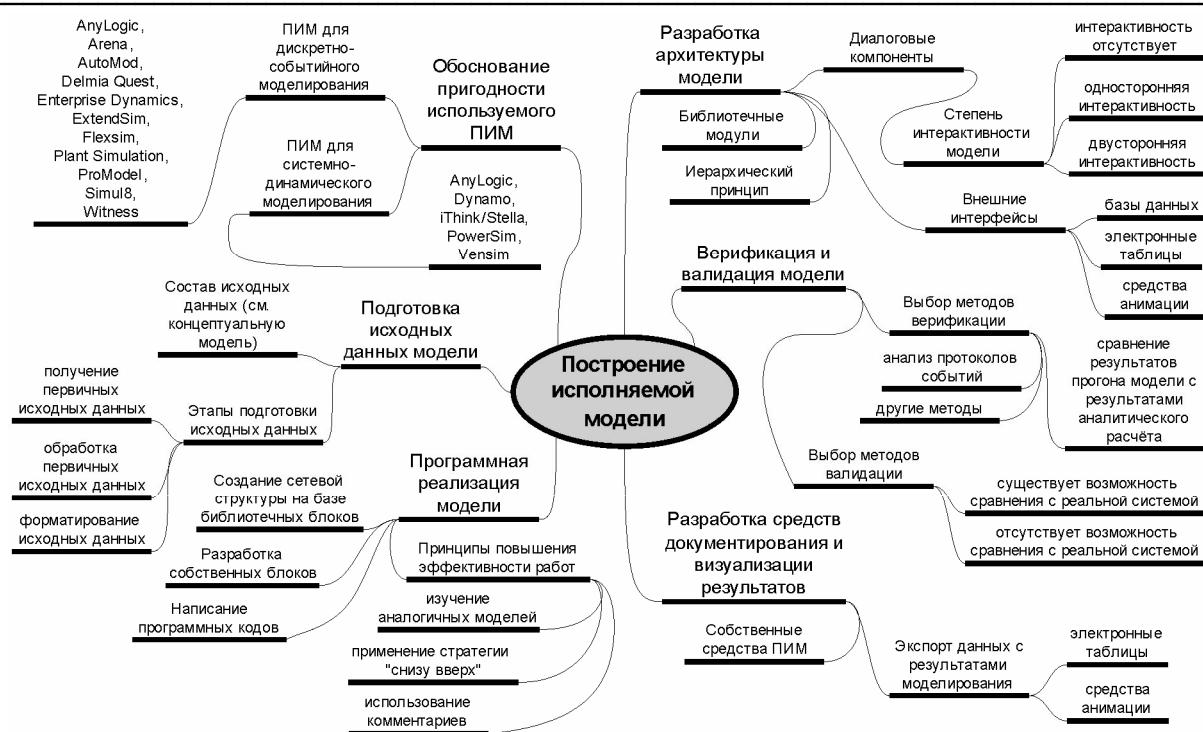


Рис. 4. Элементы этапа «Построение исполняемой модели»

Этап 5: Планирование и реализация имитационных экспериментов

Еще до начала проведения рабочих экспериментов с моделью должно быть принято решение о способах и пределах варьирования длительностью одного прогноза, выраженной в единицах времени модели (модельного времени). В литературе (см., например, [2]) часто встречаются понятия «прогон с естественным остановом» и «прогон без естественного останова», хотя применяются и другие термины для обозначения этих двух способов определения момента окончания прогноза. В моделях производственных и логистических систем чаще применяется первый способ, так как любая модель становится более «похожей» на реальную систему, если воспроизводимые в ней процессы привязаны ко времени суток и дням недели. При «естественном останове» момент окончания прогноза задается однозначно, и он соответствует определенному количеству часов, рабочих смен, рабочих дней или недель, которые составляют длительность прогноза. При моделировании «без естественного останова» предполагается, что статистические свойства процессов не изменяются с течением времени, а длительность прогноза может быть как угодно большой и определяться она должна требованиями к точности результатов моделирования, оцениваемой с помощью методов математической статистики.

Варианты модели, соответствующие общему (стратегическому) плану работы с моделью (рис. 5), создаются, как правило, с целью оценки и сравнения соответствующих вариантов построения и/или организации работы исследуемой системы. Можно считать, что каждому отдельному варианту системы соответствует свой вариант модели. Чаще всего различными бывают варианты структуры системы или варианты стратегий и правил управления процессами в системе.

Серии имитационных экспериментов организуются в рамках исследования соответствующих вариантов модели. Данный этап работы с моделью иногда называют также *тактическим планирование мимитационных экспериментов*. Оно основывается на представлении модели в виде «черного ящика», на входе которого показаны все входные (варьируемые) параметры модели, а на выходе – показатели процесса ее функционирова-

Пленарные доклады

ния, причем как те, так и другие специально выбираются для проведения конкретной серии имитационных экспериментов. Практически никогда при этом не используется все множество потенциально варьируемых или настроек параметров, определенное при разработке концептуальной модели, так как их количество может достигать нескольких сотен.

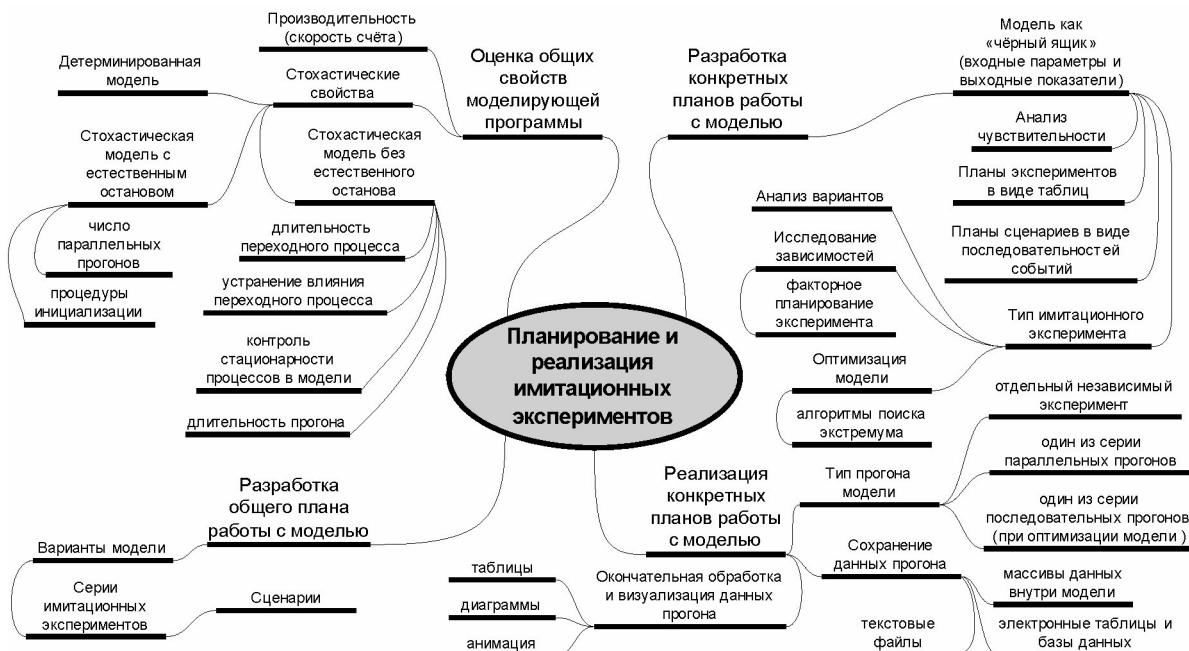


Рис. 5. Элементы этапа «Планирование и реализация имитационных экспериментов»

Под *сценарием* часто понимают такой вариант исходных данных модели, который содержит не только численные значения отдельных «статических» параметров, но и описания конкретных «динамических» процессов, которые должны быть «разыграны» во время прогона модели.

Этап 6: Представление и интерпретация результатов моделирования

В реализации последнего этапа процесса разработки и использования модели (рис. 6) участвуют оба участника имитационного проекта: разработчик модели и конечный пользователь (заказчик). Разработчик модели должен «понятным языком» объяснить то, что он видит в качестве результатов как каждого отдельного прогона модели, так и целых серий прогонов, выполненных в рамках соответствующих экспериментов. Первая задача конечного пользователя заключается в том, чтобы понять сущность и оценить правдоподобность представленных результатов моделирования, а вторая – принять решение относительно способов учета этих результатов при решении соответствующих задач проектирования, планирования или управления производственным или логистическим предприятием.

Один из вариантов модели рекомендуется принять в качестве базового. Он используется для пояснения конечному пользователю основных *форм представления результатов моделирования*, включая анимацию. Базовый вариант модели должен отображать такой режим работы системы, который хорошо знаком пользователю. В идеальном случае модель достаточно адекватно отображает существующий режим работы реальной системы. Если система еще не существует, то в базовой модели стараются показать режим работы, который соответствует описанию, составленному самим пользователем. Пояснить эффекты, наблюдаемые в других вариантах модели, легче всего путем сравнения результатов моделирования этих вариантов с результатами моделирования базового варианта.

Пленарные доклады



Рис. 6. Элементы этапа «Представление и интерпретация результатов моделирования»

Понятно, что именно конечный пользователь, хорошо знакомый с процессами в моделируемой системе, способен оценить полезность результатов проведенного имитационного моделирования. С «философией» и «техникой» имитационного моделирования он совсем не обязан быть знаком, поэтому он имеет право формулировать «самые странные вопросы» на рассматриваемом последнем этапе работы с моделью. Задачей разработчика модели является подготовка ответов на любые вопросы пользователя, причем в случае необходимости он должен показать в модели все те «первоначальные числа», на которых основываются сделанные им заключения о характере протекающих в модели процессов. Вероятность появления у пользователя «странных вопросов» уменьшается, если он принимал активное участие в реализации всех предыдущих этапов имитационного исследования.

Заключительные замечания

Возможными представляются, как минимум, два способа практического использования приведенных в данной работе диаграмм. Начинающий разработчик моделей может ознакомиться с их содержанием еще до начала имитационного проекта с целью проверки своей готовности приступить к этой работе. Если какие-то позиции на диаграммах покажутся ему незнакомыми, он может обратиться к известной литературе (например, [1–3]) или к другим, более современным источникам, например, в Интернете. На начальной фазе проекта разработчики могут просто «обвести карандашом» те позиции на диаграммах, которые они считают наиболее важными или просто актуальными для рассматриваемого проекта, и зачеркнуть те позиции, которые в данном проекте не должны получить своего отражения. Конечно, они всегда могут добавить в диаграммы и собственные позиции, особенно там, где на исходных диаграммах применено слово «другие» (объекты, методы, параметры и т.п.). В таком виде диаграммы могут использоваться как исходный материал, например, при подготовке презентации идеи имитационного проекта заказчику или при написании технического задания на разработку модели.

Пленарные доклады

Литература

1. **Шенон Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978.
2. **Лоу А.М., Кельтон В.Д.** Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. – СПб.: Питер; К.: BHV, 2004.
3. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 2009.
4. **Толуев Ю.И., Иванов Д.А.** Инженерные традиции в имитационном моделировании производственных и логистических систем // Имитационное моделирование. Теория и практика: сб. Пятой всероссийской науч.-практ. конф. – СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС, 2011. – С. 75–82.
5. **Толуев Ю.И., Бабина О.И.** Системно-динамическое моделирование промышленного предприятия по производству бетона // Бизнес-информатика. – 2011. – № 2. – С. 20–30.
6. **Толуев Ю., Змановская Т.** Имитационная модель производственной линии на базе сложной конвейерной системы // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 7. – С. 37– 41.