

*О.В. Жермаль, Н.В. Фролова*

*Пермский государственный университет*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В УПРАВЛЕНИИ МАТЕРИАЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ**

В статье рассмотрены особенности процесса моделирования материальных потоков и примеры практического применения механизмов имитационного моделирования для управления материальными потоками.

Под материальным потоком будем понимать непрерывное изменение движения продукта труда по стадиям производства и в сфере обращения, в том числе, и рециркуляцию отходов [1]. Таким образом, с точки зрения процессного подхода, материальный поток на предприятии – это совокупность процессов, связанных с добычей, обработкой, переработкой, а также распределением материальных благ в конкретных областях производства. Задачи, которые выполняются на протяжении всего пути движения материального потока, могут быть следующие: закупка, снабжение, складирование, управление производством, исполнение заказа, распределение готовой продукции.

Зачастую комплексные динамические процессы такие, как управление материальными потоками, на практике могут быть воспроизведены с помощью современных систем моделирования в относительно простой форме. Проигрывая различные сценарии в имитационной модели, можно получить ценные знания о рассматриваемой системе, например, обнаружить ее узкие места, выявить, каким образом взаимодействуют ее элементы, определить время протекания системных процессов [2].

Имитационное моделирование включает в себя 2 этапа: собственно построение модели и анализ. Построение модели подразделяется в свою очередь на проектирование, расчет модели, интерпретацию результатов и адаптацию. На первом этапе должны быть четко сформулированы цели имитационного моделирования. Если исходить из критерия минимизации

издержек, то можно разделить типичные цели имитационного моделирования материальных потоков на три категории:

1. Прогнозирование: оценка системного поведения посредством случайных (стохастических) событий, определений границ производительности, резервов и/или узких мест.
2. Оптимизация: анализ и оптимизация протекающих процессов, сравнение различных вариантов решения, тестирование запасных стратегий, комбинирование с математической оптимизацией, например поиск кратчайших путей, сокращение времени, повышение эффективности использования отдельного объекта, производственная оптимизация, снижение расходов.
3. Валидация: предотвращение ошибок планирования, обеспечение функциональности, квантификация влияний параметров, перепроверка инвестиционных структур и макетов.

Только если точно сформулированы цели, имитационная модель может быть концептуализирована. При этом расширяются все требования, в том числе к граничным условиям и базисным данным, которые также анализируются и интегрируются в (математическую) модель. Здесь должны быть приняты во внимание две важные области:

1. Какие данные (какого качества и актуальности) мы имеем в распоряжении.
2. Степень детализации должна быть выбрана таким образом, чтобы с одной стороны была гарантирована полнота модели, но с другой стороны не были слишком высоки издержки моделирования и в том числе системные работы.

Затем построенной математической модели ставится в соответствие имитационная модель, которая позволяет с помощью специальных инструментов имитации выполнить расчеты. Полученные по модели результаты в последующем валидируют и устанавливается их взаимосвязь с реальными данными. Обычно в процессе моделирования требуется

множество итераций, чтобы успешно завершить имитационный проект.

После создания имитационной модели и проверки, ее можно использовать с незначительными издержками на этапе анализа для планирования, анализа количественных изменений или адаптации объектов.

В анализе, как и в построении модели, важны цели, определяющие последовательность шагов анализа:

1. Сценарный анализ: рассмотрение и сравнение различных альтернативных сценариев, которые определяются через изменение входных величин и параметров. В исключительных ситуациях сценарии могут генерироваться автоматизировано.
2. Оптимизация: с помощью математической целевой функции устанавливаются лучшие результаты посредством оптимизационных процессов. Часто здесь применяют эвристические методы анализа.

Таким образом, можно утверждать, что имитационное моделирование необходимо начинать с постановки целей. Только вследствие этого гарантируется, что не будут получены ответы на неправильные вопросы.

Имитацию материальных потоков все чаще используют на фазе планирования. К сожалению, очень часто моделирование применяют тогда, когда появляются первые проблемы планирования. Очевидно, что было бы более осмысленным, использовать моделирование на ранних стадиях проекта, с тем, чтобы можно было сравнить различные концепции и избежать ошибок планирования.

Нужно отметить, что для осуществления имитационного эксперимента очень хорошо должны быть изучены инструменты имитации. Нельзя требовать от программного обеспечения больших результатов, чем оно может дать. Также действует следующее простое правило: «Чем сложнее система, тем осмысленнее применение имитации!» - это означает, что имитационное моделирование - это очень элегантная и экономически обоснованная возможность планировать комплексные системы и процессы и управлять ими.

Сложность системы по существу прямо пропорциональна числу и вариациям ее элементов, а также их соотношениям и переменчивости. Сложность в систему вносит и динамика. В то же время, большое число элементов или высокая степень детализации не обязательно определяют повышенную сложность системы. Многие системы при более детальном рассмотрении часто оказываются менее сложными, чем первоначально ожидали со стороны планировщика. Это становится известным на этапе моделирования посредством применения математического и системного анализа. А чтобы гарантировать экономичность и эффективность имитационного проекта, необходимо с самого начала обратить внимание на последующие этапы анализа и возможное дальнейшее циклическое использование модели.

Имитационное моделирование можно практически применять во всех областях экономики. Есть примеры, показывающие, как техника имитационного моделирования может помочь минимизировать риски, например, в индустрии напитков, прежде всего в случае с высокообъемными контейнерами (в конкретных случаях должно загружаться и выгружаться около 650 единиц ассортимента) и в инвестиционных проектах, требующих интенсивных инвестиций. Еще одним примером удачного применения имитационного моделирования является моделирование работы предприятия, состоящего из множества филиалов и типичных для него ситуаций, таких как, планирование единой службы доставки для всех филиалов, что дополнительно увеличивает степень сложности такого проекта. Показательно то, что результаты, полученные на этапе планирования посредством анализа чувствительности с помощью инструментов имитационного моделирования, при реализации проекта дают экономию и увеличение производительности.

В литературе [3-7] приведены практические интересные примеры применения имитации для оптимизации транспортных сетей в совместном предприятии, занимающемся предоставлением логистических услуг, а также для эффективного развития транспорта и перепроверки структуры транспортной сети.

Имитационное моделирование может помочь решить проблемы и в бумажной индустрии. Интересно в этой области (также как и в других областях, которые связаны с производством основных материалов) влияние технических ограничений, рассмотренных в рамках определения и моделирования проблемы в соответствующей модели, на материальные потоки.

Имитация также применяется в области поставок автомобильной индустрии, существенной особенностью которой является, прежде всего, возрастающее разнообразие продуктов и увеличивающаяся волатильность спроса. Имитация здесь может быть полезна, чтобы адекватно определить, какие марки автомобилей, в каком количестве и где могут быть наиболее вероятно заказаны для поставки.

Еще один пример удачного применения имитационной модели - поддержка реинжиниринга магазина «Cash and Carry». В магазине существовала проблема в управлении складской экономикой: временем простоя и ожидания в материальном потоке по сравнению с процессным временем. Особое внимание в модели уделялось стохастическому и часто изменяющемуся характеру процессов хранения.

Рассмотрим более подробно имитационную модель, построенную для оптимизации материальных потоков в больнице. Цель моделирования состоит в экономии средств больницы при одновременно высоких требованиях к качеству сервиса, а также в выявлении потенциалов рационализации. В модели исследуются потоки материалов, используемых в больницах (шприцы, другие расходные материалы). Движение материальных потоков во многих больницах реализуется в рамках двухступенчатой системы хранения. Внешние поставщики обслуживают центральный склад больницы, который затем осуществляет внутреннее обслуживание отделений. На примере университетской клиники города Халле (Германия) [5] показано, как может быть оптимально настроен ход данного процесса, чтобы при стохастическом спросе и соблюдении среднего уровня обеспечения материалами, минимизировать капитальные издержки в отделениях больницы. Для валидации результатов используется имитационная модель.

Таким образом, построенная складская модель предполагает стохастический спрос отделениями больницы медицинских материалов и независимость спроса от ранее накопленных материалов, т.е., не существует эффекта замещения.

При создании модели важно гарантировать определенную степень бесперебойности поставок. В области медицины стремление избежать ошибочного объема поставок имеет больший приоритет, чем соображения минимизации издержек. Однако, принимая во внимание стохастический спрос, невозможно полностью исключить ошибки в поставках. Поэтому предполагается, что различные отделения в исключительных случаях помогают друг другу материалами, а после происходит взаимозачетный возврат. В модели это учитывается посредством пометки поставок ошибочных объемов. Для уменьшения количества ошибочных поставок в модели определена доверительная вероятность  $\beta$ -степень обслуживания, равная 99,5%,  $\beta$ -степень обслуживания измеряется при этом как часть удовлетворяемого объема спроса в общем объеме.

Складская политика обеспечения процесса поставок определяется процедурой, называемой  $(r,s,q)$ -политика. При этом  $r$  промежуток времени между поставками. В том случае, если процесс не автоматизирован, то процесс поставок на границах  $r$  контролируется логистом. Когда запас некоторого материала ( $Q$ ) достиг нижней границы запаса  $s$  (минимально допустимое количество материала, обеспечивающее  $\beta$ -степень обслуживания), тогда формируется заказ на этот вид материала в размере  $q$  единиц. Таким образом, количество материала данного вида не может превышать величины  $s+q$  (определим  $s+q$  как емкость отделения по данному виду материала). Управление запасом материала данного вида осуществляется через специальный случай  $s=q$ .

Величина  $r$  рассчитывается из наблюдений за поставками данного вида материала, и зависит от емкости отделения по данному виду материала и среднего периода между поставками. Кроме того,  $s$  и объем заказа  $q$  равны, следовательно, три

переменные, отвечающие за принятие решения  $(r,s,q)$ , могут быть сведены к единственной переменной  $s$ .

$(r,s,q)$  - политика требует наблюдения за складским запасом, который определяется как сумма физического запаса и отложенных заказов за вычетом ошибочных объемов. Однако, в рамках  $(r,s,q)$  - политики контролируется только физический запас. Но если не существует ошибочных объемов, соответственно доступный складской запас является одновременно и физическим запасом. Если есть ошибочные объемы и физический запас равен нулю, то доступный складской запас является отрицательным. В обоих случаях для принятия решений о заказах безразлично перепроверяется доступный или физический запас.

Для того, чтобы минимизировать при названных предпосылках издержки, связанные со складскими запасами, при этом, однако не подвергая опасности бесперебойность поставок в больницу, нужно лишь определить наименьшее возможное значение для решающей переменной  $s$  при соблюдении данной  $\beta$ -степени уровня обслуживания. Обычно  $s$  вычисляется из условия, что спрос - случайная величина, имеет нормальное распределение. Это предполагает наличие только таких данных, как среднее значение и дисперсия наблюдаемого спроса  $Y$  в отделении. Для всех положительных уровней обслуживания  $\beta < 1$  выводится следующая нижняя граница пункта заказа:

$$s \geq \frac{\mu_Y + \sqrt{\mu_Y^2 + \sigma_Y^2 \frac{2-\beta}{1-\beta}}}{2(2-\beta)} \quad (1)$$

Эта нижняя граница, согласно формуле (1), зависит от параметров спроса  $Y$  в рисковом периоде. При этом известны исторические данные по спросу в отделении на данный вид материала, так называемый периодический спрос  $D$  (при базисном периоде от одного дня). Рисковый период охватывает время замещения  $L$  и промежуток времени между двумя поставками.

При равномерном распределении промежутков времени между двумя поставками принадлежит интервалу  $(0, r)$  и используется для расчета параметров распределения случайной величины  $Y$ .

$$\mu_Y = \left[ L + \frac{1}{2} r \right] \mu_D \quad (2)$$

и

$$\sigma_Y = \sqrt{\left[ L + \frac{1}{2} r \right] \sigma_D^2 + \mu_D^2 \cdot \frac{1}{12} r^2}, \quad (3)$$

при чем  $\mu_D$  и  $\sigma_D$  описывают математическое ожидание и стандартное отклонение периодического спроса  $D$  [5].

С помощью однопродуктовой складской модели могут быть определены количества запасов материала каждого вида в значимых отделениях. Таким образом, для каждой интересующей комбинации [вид материального запаса - отделение] определяется значение  $s$ . Модель может быть применена также и к отдельным видам материалов, при этом принимаются решения о величине запаса материала в интересующих нас отделениях. Это наглядно иллюстрируется на типичном медицинском материале, а именно, на инъекционных шприцах (5 мл) для отделений детской хирургии, детской кардиологии и для других хирургических отделений.

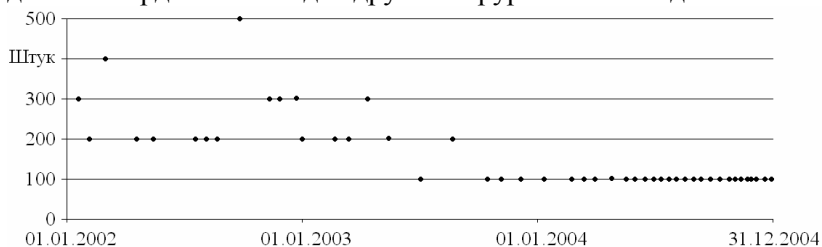


Рис 1. Заказы материалов для детской кардиологии

Исходным пунктом для применения складской модели является полученная из анализа данных информация о заказах в отделениях больницы. Эти бухгалтерские записи предварительно обработаны и графически представлены на рис.



1 на примере детской кардиологии. Здесь бросаются в глаза, прежде всего, сильно варьирующиеся расстояния между 52 заказами в рассматриваемом временном периоде до трех лет. Также из рисунка следует, что отделение сначала заказывало сильно меняющееся число единиц, а затем оставило постоянное значение объема заказа. Модуль снабжения был введен в детскую кардиологию только в ходе рассматриваемого временного периода. Этот факт, тем не менее, не имеет значения для дальнейших рассуждений на основе выбранного нормального распределения спроса. Из бухгалтерских записей трех выбранных отделений взяты перечисленные в табл. 1 выходные данные. При этом определяется среднедневной спрос  $\mu_D$  как сумма всех заказов материалов в каждом отделении, деленная на длину рассматриваемого временного периода.

Коэффициент вариации для расчета  $\sigma_D$  рассчитывается в соответствии с коэффициентами равномерного распределения  $D$  на интервале  $(0; 2\mu_D)$ . Промежуток  $r$  при известном дне поставки материала в отделение может рассматриваться в двух вариантах. В варианте А  $r$  рассматривается как максимальный промежуток времени между двумя поставками и в варианте В – как средняя длина промежутка между двумя поставками. Время замещения  $L$  составляет один день,  $\beta$ -уровень обслуживания соответственно выбран больше чем 99,5%.

Таблица 1. Выходные данные примера

	Детская хирургия	Детская кардиология	Хирургическое отделение
$\mu_D$	9,215 штук	7,391 штук	1,916 штук
$\sigma_D$	5,320 штук	4,267 штук	1,106 штук
Дни снабжения	Вторник, четверг	Вторник, пятница	Вторник, пятница
$r$ (вариант А)	5,0 дней	4,0 дня	4,0 дня
$r$ (вариант В)	3,5 дня	3,5 дня	3,5 дня
$L$	1 день		
$\beta$	99,50 %		

При применении формул (2) и (3) для определения параметров спроса в рисковом периоде минимально допустимые границы заказа следуют из (1) относительно обоих вариантов А и В. Чтобы показать влияние предлагаемой складской политики на децентрализованные складские запасы, следует присвоить начальные значения  $s$ . В основном они устанавливаются произвольно, однако с учетом высоких требований бесперебойности снабжения, их следует назначать самим на основе экспертных оценок, тем самым, обеспечивая некую безопасность поставок. Основываясь на определенных значениях  $s$ , можно найти значение среднего складского запаса [5]:

$$\bar{Q} \approx \frac{(2s - \mu_Y) + (s - \mu_Y)}{2} = \frac{3}{2}s - \left[ L + \frac{1}{2}\tau \right] \cdot \mu_D \quad (4)$$

При знании средних цен за единицу (здесь 0,0243€ за инъекционные шприцы 5 мл) могут быть, наконец-то, определены значения складских запасов в денежном выражении и их изменения. Обзор этих величин можно увидеть в табл. 2.

Таблица 2. Результаты примера

	Детская хирургия	Детская кардиология	Хирургическая станция
$s$ (первоначально)	100 штук	100 штук	200 штук
$s$ (вариант А)	135 штук	92 штуки	24 штуки
$s$ (вариант В)	104 штуки	84 штуки	22 штуки
Значение складского запаса (согласно вар. А)			
первоначально	2,86 €	3,10 €	7,14 €
новое	4,13	2,81 €	0,73 €
изменение	1,27€ (45%)	-0,29€(-9%)	-6,41€ (-90%)
Значение складского запаса (согласно вар. В)			
первоначально	3,03 €	3,15 €	7,16 €
новое	3,17 €	2,57 €	0,67 €
изменение	0,15€ (5%)	-0,58€ (-19%)	-6,48€ (-91%)

Таким образом, чтобы обеспечить уровень обслуживания 99,5%,  $s$  для инъекционных шприцев 5мл для детской хирургии должен быть увеличен, в то время для других двух отделений принципиально рекомендовано сокращение первоначально выбранных нижних границ складского запаса. Реальное значение показателей складского запаса при высоком процентном снижении уменьшилось незначительно. Тем не менее, в этих отделениях необходимо в два раза уменьшить  $s$ , чтобы экономить ограниченные ресурсы складских объемов. Также наблюдается снижение рисков истечения срока годности материалов и снабжения недостаточным количеством материала данного вида.

В общих чертах можно установить, что согласно варианту А для 8% и варианту В для 7% всех рассматриваемых комбинаций [вид материального запаса - отделение] в университетской клинике Хале, необходимо увеличение  $s$ , чтобы гарантировать целевой  $\beta$ -уровень обслуживания. Для дальнейших 16% комбинаций подтверждается первоначальное значение  $s$ . В целом имеется потенциал снижения заказов. Из табл. 2 можно видеть, что для варианта В целевое снижение издержек складского запаса выше, чем для варианта А, на основе более коротких интервалов наблюдения уменьшаются складские издержки. Если предлагаемые рекомендации будут строго соблюдены, то в общей сложности, будет получено сокращение децентрализованных складских запасов, примерно на 70%. Это соответствует по выбранному варианту их снижению в денежном выражении на 260000-290000€. При этом 80% основаны на целевом снижении значения запасов только лишь 28% комбинаций [вид материального запаса - отделение], которые способствовали улучшению ситуации с запасами (это видно из рис. 2).

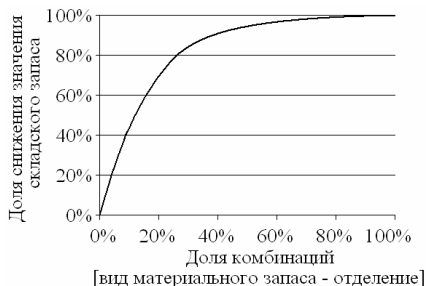


Рис. 2. Совокупная доля комбинаций в снижении значения складского запаса

При применении имитационных методов на предприятиях (это может быть в ходе подготовки стратегических решений или даже онлайн, в рамках оперативного управления материальными потоками) возникают многочисленные вопросы, которые требуют методической поддержки. Так соотношение издержек и выгоды в преддверии имитационного исследования зачастую не оценивается, и ставит предприятие при создании модели и последующей валидации этой модели перед многочисленными проблемами. Еще один типичный практический феномен - это неожиданный подъем сложности во время хода проектирования: что вначале (прежде всего на уровне менеджмента) относилось к простым проблемам, часто оказывается при последующем детальном рассмотрении проблемами, обладающими очень специфическими взаимосвязями, с многочисленными параметрами и вариациями. В таком случае есть возможность, сначала рассчитать сценарии материальных потоков что называется «на бумаге», что может принести огромную пользу предприятию при анализе издержек и инвестиций, а также при взвешивании риска или анализе чувствительности показателей.

В имитационном моделировании также привлекает то, что при проведении имитации материальных потоков, отображая результаты моделирования с помощью анимации и графических изображений, можно получить наглядные ценные знания об исследуемых экономических системах. При этом применение имитации оправдывается тем, что с ее помощью достигается длительное увеличение экономичности, без потери качества.

Задействованные высокие инвестиционные затраты амортизируются очень быстро и в идеальном случае, если будут соблюдены пара важных пунктов, приводят к уменьшению долгосрочных издержек и увеличению эффективности.

### **Библиографический список**

1. Бланк И.А. Словарь-справочник финансового менеджера. - К.: Ника-Центр, 1998 – 480с.
2. Лоу А., Кельтон В. Имитационное моделирование - СПб.: Питер, 2004 – 847с.
3. Duve H.-P., Bernhard J. Kollaborative Planung und Simulation einer intralogistischen Hochleistungsanlage für die Getränkeindustrie // Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement. 2008.
4. Eley M., Zirpnis P. An Extended Sequential Ordering Problem in the Paper Industry. // Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement. 2008.
5. Hantschmann A., Bierwirth C. Optimierung von Materialflüssen in Krankenhäusern. // Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement. 2008.
6. März L. Anwendungsumgebung zur Simulation und Optimierung von Transportnetzen. // Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement. 2008.
7. Poiger M., Reiner G.. Gestaltung und Bewertung von «Just-in-Sequence» - Anlieferung in der Automobilindustrie. // Praktische Anwendung der Simulation im Materialflussmanagement. 2008.