



Юрий Толуев
 Фраунгоферский институт IFF, Магдебург,
 Институт транспорта и связи, Рига,
 профессор, д.т.н.



Татьяна Змановская
 Рижский технический университет, Рига,
 магистр инж. наук

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Часть I

АННОТАЦИЯ. В работе рассматриваются практические способы решения задач оптимизации транспортно-складских систем с применением их имитационных моделей. Описываются особенности разработки и применения моделей транспортно-складских систем, приводится пример решения задачи оптимизации сложного подвешного монорельсового конвейера.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Транспортно-складские системы, имитационное моделирование, методы поисковой оптимизации.

ANNOTATION. The article explains the practical methods for solving of optimization problems in transport and storage systems using their simulation models. The features of transport and storage systems models development and application, and an example of the optimizing the complex suspended monorail conveyor problem solving are described in this article.

KEY WORDS. Transport and storage systems, computer simulation, search methods for optimization.

Хотя все три понятия, включенные в заголовок, широко применяются в лексиконе инженеров, менеджеров и экономистов, необходимо уточнить их, так как описываемые в статье способы работы с моделями предполагают знание вариантов толкования этих понятий специалистами различных профессий, занятых в современной логистике.

Транспортно-складские системы

Понятие транспортно-складской системы (комплекса) хорошо знакомо специалистам по логистике – уже в течение нескольких десятков лет оно применяется в названиях учебников и монографий, а во многих вузах читают лекции по предме-

ту именно с таким названием. Чисто академическое определение этого понятия вряд ли существует, так как в нем, видимо, нет особой необходимости. Авторам не удалось найти такое определение ни в современном Интернете, ни в старом учебнике, написанном с соблюдением строгих методических правил [1]. Чаще всего понятие транспортно-складской системы (ТСС) определяется путем перечисления логистических систем или их элементов, по отношению к которым это понятие можно применять. Один из вариантов такого перечисления, который не претендует на полноту и систематичность, имеет следующий вид:

- просто склад или складская система (складской комплекс) любого размера и назначения;
- отдельный грузовой фронт или несколько взаимосвязанных грузовых фронтов на террито-

рии грузового района, который может быть железнодорожной грузовой станцией, речным или морским портом, грузовым терминалом аэропорта;

- универсальный или специализированный грузовой или пассажирский терминал, например, контейнерный терминал или зона обслуживания пассажиров в аэропорту;
- центр снабжения одного или нескольких производственных предприятий, участок приемы и складирования сырья и материалов или участок складирования и отправки готовой продукции производственного предприятия;
- центр распределения товаров в торговой системе, центр расылки или перевалки грузов и товаров, в том числе почтовых отправлений.



Главные функции ТСС сводятся к перевалке и складированию грузов и товаров. К вспомогательным функциям, которые в разных комбинациях применяются в ТСС различного назначения, относят комплектацию заказов клиентов, упаковку и распаковку товаров, маркировку и этикетирование, обработку пустой тары и др. Особенностью любой логистической системы, относящейся к классу ТСС, является ограниченность ее пространственного расположения, т.е. такая система должна находиться под одной крышей, на одной или нескольких смежных территориях. Это значит, что при проектировании или реконструкции ТСС предметом рассмотрения являются способы организации ее внутренних материальных потоков, в то время как ее внешние потоки, реализуемые с помощью обычных видов наземного, водного или воздушного транспорта, как правило, считаются заданными.

Оптимизация на базе моделей

При определении понятия оптимизации, которое используется в практике исследования ТСС, следует исходить из двух дихотомий, которые показаны на рис. 1 в виде морфологической таблицы:

- дихотомия 1: стремление улучшить показатели функционирования системы по сравнению с некими исходными или стремление найти наилучший вариант ее организации;
- дихотомия 2: оценка показателей (ожидаемых свойств) вариантов системы на основании мыслительной (качественной)

модели или на основании исполняемой (количественной, математической) модели.

Дихотомия 1 пока не требует дополнительных пояснений, а дихотомия 2 поясняется с помощью нижеприведенного текста и рис. 2.

В случае 2.1 для оценки сравниваемых вариантов системы применяют экспертные методы. Это значит, что при заданных параметрах реальной системы эксперт сразу выдает значения критериев оптимизации, которые используются в процедуре выбора наилучшего варианта. В этом случае преобразование $\bar{X} \rightarrow F_i(\bar{X}), i = \overline{1, m}$ выполняется в голове эксперта, т.е. он уверен в том, что его опыт и знание аналогичных систем позволяют ему достаточно точно оценить основные свойства заданного варианта организации рассматриваемой системы. При $m = 1$ задачу оптимизации называют однокритериальной, а при $m > 1$ многокритериальной. При оптимизации ТСС экспертными методами чаще всего задача формулируется как многокритериальная. Для решения таких задач применяют методы теории принятия решений, например морфологический анализ, анализ типа «затраты–полезность», методы

парных сравнений или таблицы принятия решений.

В случае 2.2 для оценки сравниваемых вариантов организации ТСС применяют три типа математических моделей:

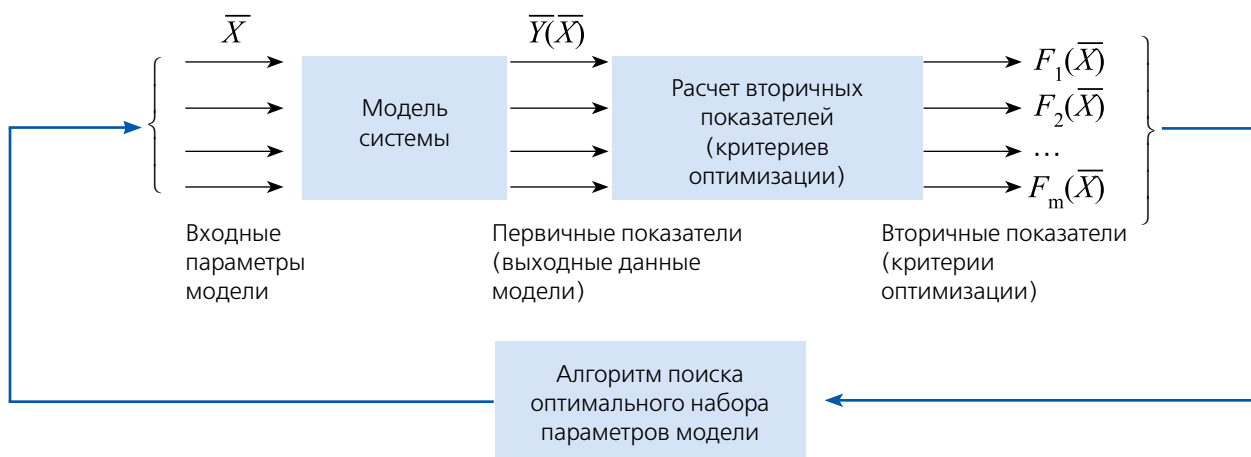
- оптимизационные модели исследования операций (модели математического программирования);
- формулы для инженерных расчетов (аналитические расчетные модели);
- имитационные модели.

Структура модели математического программирования (МП) хорошо известна: назначается множество переменных \bar{X} и формулируется единственный критерий оптимизации (целевая функция) $F(\bar{X})$, а также множество ограничений, накладываемых на значения переменных \bar{X} . Так как решение задачи МП сводится к поиску набора входных параметров модели (значений переменных \bar{X}), который обеспечивает минимальное или максимальное значение критерия оптимизации, модели данного типа предполагают формулировку задачи строгой оптимизации только в форме альтернативы 1.2, показанной на рис. 1. Для численного решения

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Дихотомия 1: цель оптимизации	1.1. улучшение значений показателей функционирования	1.2. поиск наилучших значений показателей функционирования
Дихотомия 2: тип используемой модели	2.1. использование мыслительной (качественной модели)	2.2. использование исполняемой (количественной, математической) модели

▲ Рисунок 1. Способы определения задачи оптимизации



▲ Рисунок 2. Модель как способ оценки значений критериев оптимизации

задач МП существует множество методов и готовых компьютерных программ, например надстройка «поиск решения» в MS Excel. Применительно к ТСС с помощью МП решают следующие статические задачи оптимизации:

- определения географического положения складов и логистических центров;
- оптимизации планов территорий и помещений ТСС;
- оптимизации путей и маршрутов движения транспортных средств на территории ТСС;
- оптимального размещения груза на носителях.

Формулы и диаграммы, полученные как аналитическим путем, так и эмпирически на основе данных измерений, сегодня широко применяют для расчета показателей функционирования различных подсистем ТСС. Типичными примерами являются формулы для расчета производительности крана-штабелера на высотном стеллажном складе или производительности (пропускной способности) участка приемки или отгрузки товаров. Именно такие формулы можно применять в качестве модели системы, показанной на рис. 2. Как и модели МП, этот класс моделей относят к статическим, т.е. в них не предусмотрена возможность отображения развития исследуемых процессов во времени.

В отличие от моделей МП при работе с аналитическими или имитационными моделями, на основании заданных входных параметров \bar{X} сначала в явной форме рассчитывается множество (вектор) первичных показателей $\bar{Y}(\bar{X})$, а потом один или несколько критериев оптимизации $F_i(\bar{X})$, $i = \overline{1, m}$.

Показатели $\bar{Y}(\bar{X})$ являются физическими величинами, для прямого расчета или их статистической оценки применяют соответствующие модели. Типичными являются показатели производительности или пропускной способности, измеряемые как объем работы в единицу времени, показатели загрузки ресурсов ТСС, измеряемые с помощью коэффициентов загрузки по времени или по вместимости, а также показатели, характеризующие длительность выполнения отдельных операций или производственных заказов, например время, потраченное на комплектацию заказа и отгрузку товаров заказчику. При однокритериальной оптимизации в качестве критериев $F(\bar{X})$ чаще всего используют специально вычисляемые показатели затрат, но можно применять и первичные показатели из группы $\bar{Y}(\bar{X})$. При многокритериальной оптимизации в качестве отдельных критериев $F_i(\bar{X})$ можно применять как первичные показатели из группы $\bar{Y}(\bar{X})$, так и специально вычисляемые экономические показатели.

Способ реализации блока «Алгоритм поиска оптимального набора параметров модели» зависит от решения, выбранного на основе дихотомии 1 (рис. 1). При выборе альтернативы 1.1 поиск сводится к перебору конкретных комбинаций значений входных параметров модели \bar{X} , заданных исследователем модели и не зависящих от значений критериев $F_i(\bar{X})$, полученных при уже реализованных комбинациях. Это значит, что вместо последовательного поиска наилучшей комбинации значений входных параметров реализуется конкретный план экспериментов с моделью,

и в качестве результата выбирается эксперимент, при котором были получены самые предпочтительные значения критериев $F_i(\bar{X})$, $i = \overline{1, m}$. Следует отметить, что при использовании нескольких критериев задача выбора наилучшего варианта организации ТСС может быть решена до конца только с помощью формирования и применения эвристических правил в рамках экспертных методов теории принятия решений, уже упомянутых выше.

Решение в пользу альтернативы 1.2 при работе с аналитическими или имитационными моделями автоматически предусматривает применение методов глобальной поисковой оптимизации, так как связь между параметрами модели \bar{X} и критериями $F_i(\bar{X})$ может быть какой угодно сложной. При работе с аналитическими моделями, основанными на формулах и диаграммах, такая связь еще может быть проанализирована математически, а модель может быть представлена в виде так называемого «серого ящика». Если же в качестве модели системы, показанной на рис. 2, используется имитационная модель, связь между параметрами и критериями можно попытаться оценить только экспериментально, а модель может быть представлена только в виде «черного ящика». Методы глобальной поисковой оптимизации в течение многих лет разрабатываются специалистами в области искусственного интеллекта и вычислительной математики. Известно большое количество алгоритмов, которые относятся к группам с такими названиями, как метаэвристический подход, эволюционные и генетические алгоритмы.

В качестве примеров конкретных метаэвристических алгоритмов можно назвать алгоритм табу-поиска, метод имитации отжига, итеративный локальный поиск и алгоритмы оптимизации муравьиной колонии. Следует отметить, что все эти алгоритмы ориентированы на работу лишь с одним критерием оптимизации $F(\bar{X})$, который должен быть выбран из множества возможных критериев $F_i(\bar{X})$ или специально сформирован исследователем модели перед запуском процедуры автоматической оптимизации. Ясно, что направленный поиск оптимального варианта организации системы можно проводить и в ручном режиме, когда сам исследователь выбирает новые значения параметров \bar{X} для очередного шага процесса оптимизации на основании анализа результатов, полученных на предыдущих шагах. При этом допустимо одновременное применение нескольких критериев.

Практически во всех современных пакетах имитационного моделирования (ИМ), используемых для исследования ТСС, имеются готовые программные модули, которые могут выполнять функции блока «Алгоритм поиска оптимального набора параметров модели» (рис. 2). При работе с собственными аналитическими моделями процессов в ТСС, например, в среде MS Excel, исследователь должен найти или запрограммировать самостоятельно хотя бы один из алгоритмов глобальной оптимизации, например, с использованием языка программирования VBA для MS Excel. Известно, что все методы поисковой оптимизации работают на основе принципа проб и ошибок, т.е. соответствующий алгоритм предусматривает реализацию большого количества прогонов модели, которое зависит от числа и типа варьируемых параметров модели, логики и параметров настройки самого алгоритма оптимизации и степени гладкости связи $F(\bar{X})$, которую в одномерном или двумерном случае, т.е. при числе параметров \bar{X} не больше двух, изображают графически в виде поверхности отклика. Считается нормальной ситуация, когда, например, при пяти варьируемых параметрах дискретного типа для достижения приемлемого с точки зрения близости к идеальному решению реализуется 5–10 тысяч прогонов модели. Если модель является настоящей имитационной, на реализацию

одного ее прогона может тратиться от нескольких секунд до нескольких минут процессорного времени, а длительность процесса оптимизации может достигать десятков часов.

Вторую часть статьи читайте в № 2 журнала «ЛОГИСТИКА» за 2016 год.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смехов А.А. Автоматизация управления транспортно-складскими процессами: Учебное пособие для вузов. – М.: Транспорт, 1985.
2. Толуев Ю.И. Имитационное моделирование логистических сетей // Логистика и управление цепями поставок. – 2008. – № 2 (25). – С. 53–63.
3. Zvirgzdiņa V., Tolujevs J. Simulation-Based Metaheuristic Optimization of Logistics Systems // Proceedings of the 12th International Conference «Reliability and Statistics in Transportation and Communication», 17–20 October 2012, Riga, Latvia. – P. 221–226.
4. Толуев Ю.И. Стандартные этапы создания имитационных моделей производственных и логистических систем // 6-я Всерос-

сийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД–2013). – Казань: Изд-во «ФЭН» Академии наук РТ, 2013. – Т. 1. – С. 80–89.

5. Тимченко В.С. Перспективы применения имитационного моделирования при оценке мероприятий по развитию транспортного комплекса Арктической зоны РФ // Интернет-журнал «Мир науки». – 2015. – № 1; <http://simulation.su/uploads/files/default/2015-timchenko-1.pdf>.
6. Долганов К.Б., Зуев В.А. Особенности создания имитационной модели распределительного центра // 7-я Всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД–2015). – М.: ИПУ РАН, 2015. – Т. 2. С. 110–114.
7. <http://www.anylogic.ru/case-studies/choosing-the-right-warehouse-layout-for-a-leading-fmcg-retailer>.
8. <http://www.anylogic.ru/case-studies/modeling-operations-at-pharmaceutical-distribution-warehouses>.

