

УДК: 004.9; 693.54

Разработка оптимизационной имитационной модели для поддержки процессов планирования складских систем

О.И. Бабина

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»,
Институт управления бизнес-процессов и экономики,
Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26а

E-mail: babina62@yahoo.com

Получено 26 февраля 2014 г.,
после доработки 7 апреля 2014 г.

В статье рассматриваются вопросы применения метода оптимизации для поддержки процессов планирования складских системах с помощью технологии имитационного моделирования. Исследованы механизмы взаимосвязи оптимизационной и имитационной моделей, а также подробно описан алгоритм разработки оптимизационной имитационной модели складской системы для поддержки процессов планирования.

Ключевые слова: склад, имитационное моделирование, методы оптимизации, пакеты оптимизации

Development of simulation optimization model for support of planning processes of warehouse systems

O. I. Babina

*Siberian federal university, Institute of business process and management,
26a Kirenskogo st., Krasnoyarsk, 660074, Russia*

Abstract. — In the article, the questions of application of a optimization method for support of planning processes in warehouse systems by means of simulation are considered. Mechanisms of interrelation of optimization and simulation models are investigated, and also the algorithm of simulation optimization model development of warehouse system for support of planning processes is described in detail.

Keywords: warehouse, simulation, optimization methods, optimization software

Citation: Computer Research and Modeling, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 295–307 (Russian).

Работа выполнена в рамках реализации проекта «Разработка оптимизационной имитационной модели промышленного предприятия» (регистрационный номер проекта — 11.7192.2013) аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки Российской Федерации и Германской службы академических обменов (DAAD) в Институте организации и автоматизации производства общества Фраунгофера (Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Магдебург, Германия).

Введение

Имитационное моделирование является современным инструментом для решения задач планирования складских систем. Суть имитационного моделирования заключается в разработке компьютерной программы и проведении серии вычислительных экспериментов с целью определения оптимальных сценариев работы моделируемой системы.

В последнее время широкое применение получила так называемая концепция оптимизации имитационного моделирования (англ. *simulation optimization*), на базе которой разработаны пакеты оптимизации, интегрированные в системы имитационного моделирования и позволяющие пользователям автоматически находить оптимальные решения [Eskandari et al., 2010; Pichitlamken, Nelson, 2002].

Можно выделить основные области применения концепции оптимизации имитационного моделирования складских систем [Andersson et al., 2008; Fu et al., 2005; Hong, Nelson, 2005]:

- Поиск оптимальных решений при определении топологии проектируемого или изменении топологии существующего склада.
- Оптимизация времени выполнения складских операций, графика работы персонала.
- Оптимизация использования складских помещений и площадей.
- Оптимизация планирования перевозок и маршрутов движения техники на складе.

Следует заметить, что границы применения оптимизации для имитационных моделей складских систем пока ещё не сформированы окончательно: в настоящее время этот метод постоянно развивается, в связи с чем появляются всё новые и новые области его применения.

В настоящее время в литературе достаточно хорошо освещены методические вопросы применения имитационного моделирования для складских систем [Ekren et al., 2012; Queirolo et al., 2002]. Однако известно сравнительно мало работ, посвящённых рассмотрению вопросов применения имитационного моделирования во взаимосвязи с методами оптимизации [Biethahn et al., 2004; Zvirgzdina, Tolujevs, 2012]. Именно исследованию механизмов их взаимодействия и посвящена данная статья.

1. Имитационное моделирование и оптимизация логистических систем

Оптимизационная имитационная модель состоит из двух моделей: имитационной и оптимизационной (см. рис. 1). Имитационная модель — программа, которая позволяет исследовать процесс функционирования системы путём проведения экспериментов на компьютере и, следовательно, может считаться виртуальной версией данной системы. Структура имитационной модели в значительной степени зависит от выбора парадигмы моделирования, соответствующей выбранному уровню абстракции на этапе постановки задачи моделирования. В настоящее время существуют три наиболее распространенных парадигмы к имитационному моделированию [Карпов, 2005a]: дискретно-событийное моделирование, непрерывное моделирование и агентное. Для каждой парадигмы разработаны свои пакеты имитационного моделирования [Сидоренко, Красносельский, 2008].

Оптимизационная модель — модель, характерной чертой которой является наличие одной (однокритериальная модель) или нескольких (многокритериальная модель) целевых функций, которые позволяют находить наилучшее решение из числа рассматриваемых альтернатив. На рисунке 1 видно, что оптимизация заключается в последовательном выполнении нескольких прогонов модели с различными значениями параметров и нахождении оптимальных для данной задачи значений этих параметров, при которых целевая функция достигает своего экстремума. Детальное рассмотрение структуры оптимизационной модели, методов и пакетов оптимизации приводится ниже.



Рис. 1. Взаимосвязь имитационной и оптимизационной моделей

2. Структура и способы реализации оптимизации

2.1. Математическая форма записи оптимизационной модели

Оптимизационная модель включает в себя три основных элемента: целевая функция, ограничения модели и её переменные. В общем виде модель оптимизации может быть описана следующими соотношениями:

$$\text{Целевая функция: } K = f(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n; \alpha_1, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_l) \rightarrow \text{extr},$$

$$\text{Ограничения модели: } g_i = g_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n; \alpha_1, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_l) \begin{cases} \leq \\ \geq \\ = \end{cases} b_i,$$

$$\text{Переменные модели: } X = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_n),$$

где K — критерий оптимальности; f — целевая функция, т. е. формализованное представление критерия оптимальности; g_i — ограничение модели, $i = \overline{1, m}$; b_i — значение ограничения модели; x_j — переменная модели, $j = \overline{1, n}$; α_k — заданный параметр модели, $k = \overline{1, l}$.

Решение задачи оптимизации заключается в нахождении множества оптимальных значений переменных

$$X^* = (x_1^*, \dots, x_j^*, \dots, x_n^*),$$

обращающих в максимум или минимум целевую функцию и удовлетворяющих ограничениям модели.

Целевая функция строится как математическое выражение, в состав которого входят выходные показатели и (иногда) заданные параметры модели. Ограничения модели сужают область допустимых решений модели, задают диапазон допустимых значений для переменных, удовлетворяющих всем заданным ограничениям, и тем самым позволяют находить приемлемые решения задачи моделирования. Ограничения могут быть двух типов: накладываемые на одну

переменную (иногда в литературе их называют границами) и накладываемые на связи между переменными модели (чаще всего их называют требованиями). Границы модели задают верхний и/или нижний диапазон значений переменных. Переменные модели — это величины, значения которых необходимо оптимизировать.

Имитационные модели иногда представляют в виде чёрного ящика (см. рис. 2) [Biethahn et al., 2004]. Это означает, что модель преобразует множество входных данных $X = (x_1, \dots, x_n)$ во множество выходных показателей функционирования моделируемой системы $Y = (y_1, \dots, y_m)$. Из имитационной модели эти величины передаются в оптимизационную модель, где по ним рассчитывается значение целевой функции $K = f(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n; \alpha_1, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_l)$.

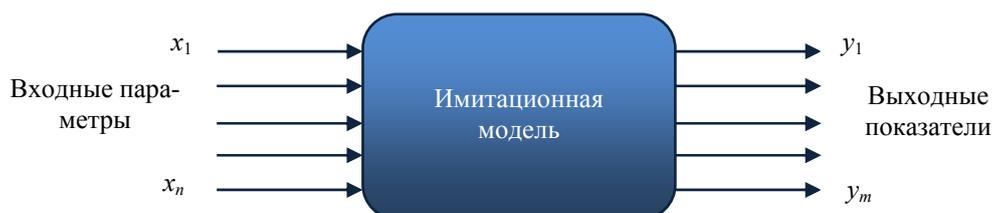


Рис. 2. Имитационная модель как чёрный ящик

Примером оптимизационной модели является задача распределения ресурсов склада. Целевая функция ориентирована на максимальное использование персонала и оборудования. Ограничением является бюджет, определяющий предельно допустимый уровень расходов на складские операции. Переменными в модели являются количество сотрудников склада и складская техника. В статье [Zvirgzdina, Tolujevs, 2012] содержится обзор целевых функций, переменных и ограничений в задачах оптимизации складских систем, составленный по материалам Winter Simulation Conference за последние несколько лет.

2.2. Методы оптимизации

В настоящее время существует большое количество методов оптимизации и их различных модификаций. В этой статье не ставится цель детально исследовать эти методы и привести их очередную классификацию, а предлагается кратко рассмотреть лишь те методы, которые применяются в современных пакетах оптимизации, предназначенных для решения практических задач в логистических системах. К ним можно отнести: генетические алгоритмы, эволюционные алгоритмы, поиск с запрещением и имитацию отжига [Nachicha et al., 2010; Law, McComas, 2000; Seijo-Vidal, Bartolomei-Suarez; 2010].

В основе генетического алгоритма лежит эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искоемых параметров. Учёные, внесшие существенный вклад в развитие генетического алгоритма, — Но и Фу.

Методика поиска по методу эволюционного алгоритма очень схожа с предыдущим методом, за исключением того, что на следующих шагах передаются только положительные изменения. Описание метода можно найти в работах Biethahn и Nissen, Yuan, Farzanegan и Vahidipour.

Поиск с запрещением сохраняет информацию о недавно сгенерированных потенциальных решениях, называемых списком запретов, возврат к которым на последующих этапах невозможен, пока не закончится временное ограничение. Данный метод рассматривался в работах следующих зарубежных учёных: Glover, Hu, Dengis и Alabas, April.

Метод имитации отжига применяется для решения задач оптимизации согласно алгоритму, который ищет глобальный минимум целевой функции, заданной на многомерном пространстве, избегая локальных минимумов. Подробное описание метода можно найти в работах Kirkpatrick, Johnson, Eglese, Koulamas, Chen, Mahmoud.

2.3. Программные пакеты оптимизации

На сегодняшний день существуют программные пакеты оптимизации, которые используются средствами имитационного моделирования. К наиболее известным пакетам оптимизации, которые интегрированы в системы имитации и которые позволяют пользователям автоматически находить оптимальные решения сложных задач, относятся AutoStat, Evolutionary Optimizer, OptQuest и SimRunner. В статье [Eskandari et al., 2011; Fu et al., 2005] представлена краткая информация об этих пакетах с указанием их поставщиков, пакетов моделирования, в которых они применяются, а также используемых алгоритмов поиска решений. Заметим, что в большинстве из них в качестве алгоритмов поиска решений используются эволюционные стратегии и генетические алгоритмы. На сегодняшний день эти методы хорошо себя зарекомендовали как универсальные алгоритмы глобального поиска, которые позволяют находить оптимальные решения за приемлемое время.

3. Факторы, влияющие на поисковую производительность оптимизационной имитационной модели

Как правило, работа алгоритмов оптимизации связана с необходимостью выполнять сотни и тысячи прогонов модели, поэтому требование высокой производительности оптимизационной имитационной модели является очень важным. Перечислим основные факторы, влияющие на поисковую производительность [Molnár, 2004]:

- степень стохастичности имитационной модели;
- количество переменных модели;
- начальные значения переменных модели;
- ограничения, накладываемые на переменные модели;
- конфигурация поверхности отклика, описывающей целевую функцию;
- скорость выполнения прогона модели.

Степень стохастичности имитационной модели.

Стохастичность значительно влияет на производительность оптимизационной имитационной модели. Основной причиной стохастичности имитационной модели являются внутренние и внешние случайные факторы моделируемой системы. Чем больше разброс результатов, получаемых на отдельных прогонах, тем менее производительной является модель.

Количество переменных модели.

В большинстве современных пакетов оптимизации нет ограничений на количество задаваемых переменных. Однако производительность вычислений может сильно ухудшиться, если в модели много переменных. В этом случае необходимо увеличивать число прогонов для получения наилучшего решения. Для моделей с очень большим количеством переменных можно сначала выделить наиболее значимые переменные и привести оптимизацию на их базе, а потом уточнить полученное решение после введения в процесс оптимизации других переменных.

Начальные значения переменных модели.

Начальные значения важны: чем ближе они приближены к оптимальному решению, тем быстрее его можно найти. Начальные значения могут быть недопустимыми, в этом случае их можно проигнорировать. Для больших моделей с большим количеством переменных следует прибегнуть к детерминированной оптимизации для нахождения хороших начальных значений. Для этого необходимо использовать предыдущие результаты в качестве начальных значений и выполнять стохастическую оптимизацию.

Ограничения, накладываемые на переменные модели.

Определив границы для переменных решения, можно ускорить процесс оптимизации. Границы переменных определяются как верхние и нижние пределы их возможных значений. Также задаются ограничения, описывающие переменными модели.

Конфигурация поверхности отклика, описывающей целевую функцию.

Целевая функция может представлять собой нелинейную поверхность с многочисленными точками минимума и максимума. В современных пакетах оптимизации существует возможность поиска оптимального решения для такого типа целевых функций. Чем сложнее вид целевой функции, тем больше необходимо выполнять прогонов для нахождения оптимального решения с заданной точностью.

Скорость выполнения прогона модели.

Для достижения требуемой точности оптимизации следует пытаться увеличить скорость выполнения одного прогона модели. Повышая скорость выполнения каждого прогона, можно увеличить и их количество, тем самым повышая производительность всей оптимизационной имитационной модели.

4. Имитационное моделирование и оптимизация складских систем

Современный склад — сложная система, состоящая из многочисленных элементов, имеющая определенную структуру и выполняющая различные операции по переработке, хранению и распределению материального потока. В свою очередь, склад является интегрированной составной частью системы более высокого уровня — логистической цепи. Основная роль складской системы заключается в планировании и оптимизации проходящего через неё материального потока.

Современным инструментом исследования материального потока складских систем является метод имитационного моделирования, который позволяет находить оптимальные параметры работы как существующего, так и проектируемого склада. Основным преимуществом метода является возможность выполнять серии компьютерных экспериментов с моделируемой системой, не нарушая и не прерывая текущие технологические операции на существующем складе, а также проверять различные сценарии работы проектируемого склада до начала его эксплуатации.

Объединение имитационного моделирования с методами оптимизации представляет собой инструмент, с помощью которого можно планировать и принимать управленческие решения на складе, эффективно поддерживая работу менеджеров. Оптимизационную имитационную модель можно определить как процесс нахождения наилучшего набора входных переменных модели без участия пользователя в оценке каждого варианта решения. Основной целью построения оптимизационной имитационной модели является получение максимума информации о работе моделируемой системы, что является предпосылкой для успешного решения задач минимизации используемых на складе ресурсов.

Рассмотрим примеры построения оптимизационных имитационных моделей для практических целей в планировании складских систем.

Модель 1. В работе [Ekren et al., 2012] исследуется производительность самого большого склада (Восточного центра распределения — Eastern Distribution Center) отдела логистики министерства обороны США (Defense Logistics Agency, DLA), расположенного в Нью-Камберленде. DLA — крупнейшая служба поддержки логистики министерства обороны США, оказывающая глобальную поддержку логистики семнадцати центрам распределения в Америке и девяти других странах. DLA получает ежедневно сотни тысяч продуктов от различных производителей и направляет их к военным базам. Основной целью моделирования такой системы является определение оптимального количества трудовых ресурсов в каждом цехе склада. Конечным итогом реализации модели является реинжиниринг существующих бизнес-процессов на основе данных, полученных в результате выполненных над этой моделью экспериментов. Имитационная модель, описывающая работу DLA, является дискретно-событийной, разработана с помощью системы имитационного моделирования Arena, а модель оптимизации — с помощью пакета OptQuest.

Модель 2. В работе [Queirolo et al., 2002] представлена разработка системы оптимизации на базе имитационного моделирования, позволяющая решать задачи оптимизации маршрута дви-

жения и времени прохождения этого маршрута на складах. Кроме того, разработана система эффективного разделения областей хранения между различными классами элементов (паллет). Система получила название Z-Sim. Оптимизационная модель системы построена на основе эвристического генетического алгоритма. Работоспособность инструмента Z-Sim апробирована на складе итальянской компании безалкогольных напитков. Результатом оптимизации модели является новая структура склада, состоящая из одиннадцати блоков с общим количеством ячеек, равным 4408, и девяти зон отгрузки, в которых находятся товары одного типа.

Модель 3. В статье [Molnár, 2004] описана модель процессов отбора на складе необходимого товара и его отправка поставщикам. Представлена дискретно-событийная модель, разработанная в Enterprise Dynamics 5.1, и многокритериальная задача оптимизации, заключающаяся в максимизации использования имеющихся ресурсов на складе, минимизации стоимости трудовых ресурсов и минимизации затрат, связанных с опозданием заказа или его преждевременным выполнением. Модель оптимизации построена на основе генетического алгоритма, разработана в программной среде Delphi. Кроме того, система интегрирована с базой данных и оснащена компьютерной анимацией. Результатом моделирования является точный план отгрузки продукции.

Модель 4. В работе [Ramírez Ríos et al., 2013] представлена модель склада в Колумбии, в которой сформирована задача наилучшего использования имеющегося пространства с учётом маршрута движения техники и количества использованных материально-технических ресурсов. Автоматизация и учёт товаров на складе ведётся с помощью RFID-технологии, позволяющей быстро находить товар на полке и определять свободное место на складе. В модели также представлена многокритериальная задача оптимизации, которая направлена на оптимизацию количества материально-технических ресурсов, находящихся на складе в течение длительного промежутка времени, оптимизацию использования свободных мест на складе, оптимизацию маршрутов движения на складе.

Модель 5. Работа [Hajnal, Kollar, 2005] посвящена моделированию процессов на складе изделий пищевой промышленности, включая процесс приёмки товара, размещения, хранения, отбора и доставки товара потребителю. Представлена дискретно-событийная имитационная модель в ExtendSim и оптимизационная модель в OptQuest. Оптимизируются используемые ресурсы на складе (оборудование и персонал) и время выполнения операций, анализируются средняя длина очереди, время нахождения в очереди и коэффициент загрузки оборудования в пунктах приёмки товара и отгрузки.

Модель 6. В работе [Ramírez Ríos et al., 2012] представлена модель работы склада косметической и фармацевтической продукции, в частности, моделируется проблема размещения товарных единиц на складе (разделение на слоты) и выбор оптимального маршрута движения при сборке заказа для производства и дальнейшей отгрузки продукции. Представлена разработка складской системы управления, состоящей из оптимизационной и имитационной моделей, интегрированных с технологией RFID. Имитационная модель разработана с помощью пакета Arena и объединена с базой данных Microsoft Access, оптимизационная модель разработана в Visual Basic на основе генетического алгоритма.

Обзор литературы по оптимизационным имитационным моделям складских систем [Ekren et al., 2012; Hajnal E., Kollar, 2005; Molnár, 2004; Queirolo et al., 2002; Ramírez Ríos et al., 2012, 2013] показал, что среди них можно выделить три наиболее распространённых типа: 1) модели использования складских помещений и площадей [Queirolo et al., 2002; Ramírez Ríos et al., 2013]; 2) модели планирования перевозок и маршрутизации движения техники на складе [Molnár, 2004; Ramírez Ríos et al., 2012]; 3) модели, оптимизирующие время выполнения складских операций и работу персонала [Biethahn et al., 2004; Grewal et al., 2009].

Модели первого типа связаны с оптимальным размещением товара на складе. Моделирование задач этого типа усложняется наличием на складе большого количества товаров, нуждающихся в хранении, переменных областей мест хранения и колебаниями спроса на товар. При оптимизационных подходах к складским проблемам данного типа часто рассматривают единственную цель — максимизацию использования имеющихся площадей. Модели второго

типа связаны с оптимальным выбором товара со склада и отправкой его потребителям. В рамках этих моделей могут решаться следующие задачи оптимизации: максимизация использования ресурсов, в том числе людских, минимизация времени простоя оборудования, поиск оптимального маршрута движения техники, минимизация стоимости отбора товара на складе. Модели третьего типа являются наиболее многочисленными. Они относятся к моделям оперативного планирования складских систем. По результатам прогона этих моделей составляется оптимальный план работы персонала и оборудования, ищется оптимальный маршрут движения техники, определяется минимальное время отбора товара, минимальные затраты на персонал.

Характерные для этих типов моделей входные параметры и выходные показатели эффективности представлены на рисунке 3. Заметим, что несмотря на всё многообразие складских систем, функции складирования остаются одинаковыми и должны удовлетворять следующим целям: оптимальное использование имеющегося пространства, оборудования и рабочей силы, максимальная доступность ко всем элементам склада и др.



Рис. 3. Входные параметры и выходные показатели имитационной и оптимизационной моделей

5. Исследование работы склада средствами имитационного моделирования и оптимизации

Как было уже отмечено выше, оптимизационная имитационная модель состоит из двух моделей, поэтому алгоритм её построения будет состоять из двух этапов (рис. 4), которые можно выполнять как последовательно (сначала построить имитационную модель, потом — оптимизационную), так и одновременно друг с другом. Рассмотрим их более детально, начав с построения концептуальной имитационной модели складской системы, так как именно она является самой важной в общей схеме алгоритма разработки оптимизационной имитационной модели, и от правильности её построения зависит качество результатов моделирования.

Построение концептуальной имитационной модели включает в себя следующие этапы: определение и описание основных компонентов внутренней структуры системы, описание структуры процессов в системе и соответствующих им конфигураций потоков, определение стратегий и правил управления процессами в системе, состава исходных данных и выходных

показателей модели, формализацию модели. Заметим, что процесс построения концептуальной модели можно рассматривать как для реально действующего, так и для проектируемого склада. Подходы отличаются возможностью получения данных для моделирования и особенностями постановки задач. В этой работе представлена концептуальная модель, в основном для склада уже существующего. Предполагается, что данные положения частично можно будет использовать и для рассмотрения процессов функционирования проектируемого склада.

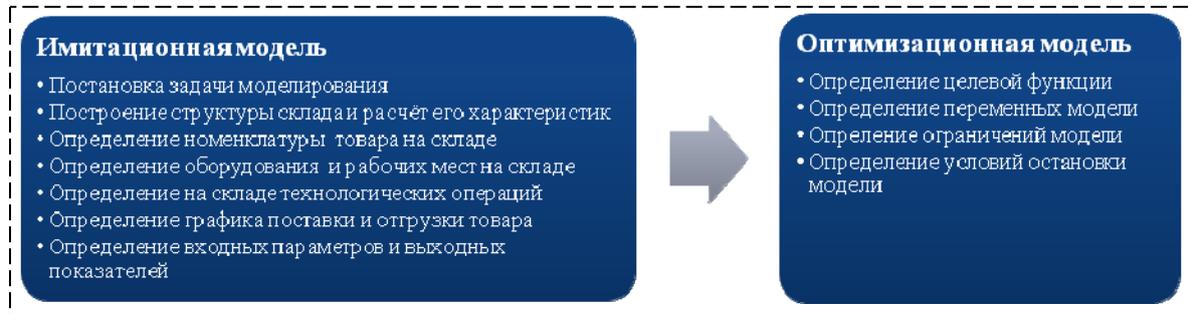


Рис. 4. Алгоритм построения концептуальной оптимизационной имитационной модели для складских систем

Алгоритм построения концептуальной имитационной модели для складской системы:

Шаг 1. Постановка задачи моделирования.

На данном шаге определяются цель и задачи моделирования. От поставленной цели и задач моделирования зависит, какие характеристики моделируемого объекта исследования считать существенными, а какими можно пренебречь. В соответствии с чётко поставленной целью может быть выбрана подходящая парадигма моделирования, определены методы решения задачи и формы отображения результатов.

Шаг 2. Построение структуры склада и определение его характеристик.

Имитационная модель (правильнее сказать — концептуальная модель) складской системы создается на основе детальной планировки склада с разметкой всех технологических зон и потоков движущихся между ними товаров, т. е. с помощью задания его топологической структуры. Для задания топологии склада необходимо указать: зоны, этажи, проходы, стеллажи, полки и позиции. С помощью топологической схемы возможно описать любую конфигурацию большого и малого складского комплекса. В одном таком комплексе может быть сколь угодно много складов. Склады, в свою очередь, разбиваются на основные технологические территории: «Зона хранения», «Зона комплектации», «Зона прихода», «Зона разгрузки» и др. При этом следует учитывать также и параметры внешней нагрузки склада. Кроме того, на этом этапе рассчитываются такие количественные характеристики склада, как ёмкость, пропускная способность, определяется режим его работы (график рабочей смены).

Шаг 3. Определение номенклатуры товара на складе.

На данном этапе определяется ассортимент товара, его основные характеристики (например, штучные, объёмные и весовые), необходимые для моделирования системы. Иногда принято соотносить товар на складе с транспортной единицей. Транспортной единицей может считаться любая тара: поддон, коробка, контейнер и т. д. На складе могут одновременно храниться и обрабатываться товары как закрепленные, так и не закрепленные за транспортными единицами.

Шаг 4. Определение оборудования и рабочих мест на складе.

Данный этап включает определение стеллажного, подъёмно-транспортного и специального оборудования склада с уточнением его технических характеристик, а также определение маршрутов движения транспортных средств. Время и место стоянки техники внутри склада также определяются. Кроме того, даются ответы на следующие вопросы: кто и какие операции выполняет на складе, в какое время, сколько на это требуется времени, какая техника при этом используется.

Шаг 5. Определение на складе технологических операций.

Возможные операции на складе подразделяются на основные и вспомогательные. Процесс обработки материального потока на складе состоит из следующих основных операций: приёмки товара, разгрузки, размещения, пополнения, планирования маршрутов, обработки заказов, отбора, упаковки, консолидации, хранения, загрузки в транспортное средство и отправки. К вспомогательным операциям на складе можно отнести, например, перемещение, обработку браков, обработку возвратов, ремонт оборудования и техники, проверку оборудования и техники на надёжность.

Шаг 6. Определение графика поставок и отгрузки товара.

На этом шаге определяется график прихода товара на склад и его отгрузки с указанием номенклатуры, объёма и времени, занимаемых складских площадей и используемых транспортных средств.

Шаг 7. Определение входных параметров и выходных показателей.

В последнюю очередь определяются входные параметры и выходные показатели модели. Входные параметры можно рассматривать как команды, а желательные значения выходных данных — как цель управления, определяющую эффективность и рентабельность складской системы. Выходные данные также иногда называют результирующими показателями прогона имитационной модели.

С остальными этапами разработки имитационных моделей (программирование модели в пакете имитационного моделирования, планирование и проведение имитационных экспериментов, анализ результатов имитационного моделирования, документирование модели и принятие решений) можно ознакомиться в литературе [Карпов, 2005б].

Следующим этапом в общем алгоритме построения оптимизационной имитационной модели является построение оптимизационной модели, которая предусматривает выполнение четырёх основных шагов:

Шаг 1. Определение целевой функции.

На данном этапе определяется тип экстремума целевой функции (максимум или минимум) с использованием выходных показателей модели, математически формализуется целевая функция.

Шаг 2. Определение переменных модели.

На данном этапе определяются переменные, которые необходимо оптимизировать путём реализации прогонов модели. Кроме того, можно задать шаг изменения переменных в модели, их верхние и нижние пределы. Для переменных нужно определить и их тип (дискретный или непрерывный).

Шаг 3. Определение ограничений модели.

Далее задают диапазон допустимых решений для переменных с помощью соответствующих ограничений. Ограничения могут быть двух типов: ограничения, накладываемые на одну переменную (см. предыдущий этап 2), и ограничения, накладываемые на связи между переменными модели. Ограничения второго типа выражаются не во всех моделях.

Шаг 4. Определение условий остановки модели.

Возможны следующие условия прекращения оптимизации после очередного прогона:

- а) остановка при достижении заданного времени обработки программы (процессорного времени);
- б) выполнение до заданного количества прогонов;
- с) автоматическая остановка при достижении значения целевой функции, которое не может быть улучшено с помощью оптимизации.

Сам процесс оптимизации заключается в следующем: задание допустимых значений переменных и прогон модели с этими переменными, расчёт значений целевой функции, анализ полученных значений целевой функции, изменение значений оптимизационных переменных в соответствии с алгоритмом оптимизации. Эти шаги повторяются заново до тех пор, пока целевая функция не достигнет своего экстремума (максимума или минимума).

Путём реализации этого алгоритма можно решать следующие задачи анализа и оптимизации складских систем [Better et al., 2007; Ekren, Heragu, 2008; Liu et al., 2011; Ramírez Ríos et al., 2013]:

- определить необходимое количество, вид и характеристики транспортно-погрузочной техники;
- определить необходимое количество и роль персонала, улучшить показатели эффективности его работы;
- определить требуемые площади для зон приёма, отгрузки, комплектации, сортировки и хранения товара;
- проверить эффективность различных вариантов расположения складского оборудования;
- определить пропускную способность склада или его части;
- вычислить время на выполнение операций (стоянка, движение), коэффициенты использования ресурсов;
- оценить динамику изменения уровня складских запасов;
- рассчитать и оптимизировать маршруты транспортно-погрузочной техники на складе;
- рассчитать показатели использования транспортных средств склада;
- рассчитать затраты на эксплуатацию склада и провести их оптимизацию;
- определить требуемое количество парковочных мест на территории склада;
- повысить показатели использования складских площадей;
- оптимизировать расписание выполнения технологических операций, связанных с движением товара на складе.

Заключение

В статье детально проанализированы механизмы взаимодействия оптимизационной и имитационной моделей логистических систем. Показано, что каждая из этих моделей имеет собственную внутреннюю структуру и алгоритм работы. Несмотря на различия, эти модели имеют общие элементы и механизмы взаимодействия, использование которых приводит к нахождению оптимальных решений.

Исследована внутренняя структура оптимизационной модели, состоящая из целевой функции, ограничений и переменных модели, и способы реализации, включающие в себя метаэвристические методы, встроенные в современные пакеты оптимизации. Приведён алгоритм, облегчающий процесс построения оптимизационной и имитационной моделей на этапе концептуального моделирования.

Оптимизация процессов планирования логистических систем с использованием технологии имитационного моделирования является эффективным средством анализа их структуры, позволяет эффективно организовать работу таких систем, наметив оптимальные стратегии развития, помогает совершенствовать методы планирования и повышать эффективность и продуктивность функционирования системы в целом.

Список литературы

- Карпов Ю. Г.* Изучение современных парадигм имитационного моделирования в среде Anylogic // Компьютерные инструменты в образовании. — № 4. — 2005а. — С. 3–14.
- Карпов Ю. Г.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005б. — 400 с.
- Сидоренко В. Н., Красносельский А. В.* Имитационное моделирование в науке и бизнесе: подходы, инструменты, применение // Бизнес-информатика. — № 2. — 2008. — С. 52–57.
- Andersson M., Amos H. C. Ng, Grimm H.* Simulation optimization for industrial scheduling using hybrid genetic representation // Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. — 2008. — P. 2004–2011.

- Better M., Glover F., Laguna M.* Advances in analytics: Integrating dynamic data mining with simulation optimization // *IBM J. RES. & DEV.* — 2007. — Vol. 51, No. 3/4. — P. 476–487.
- Biethahn J., Lackner A., Range M., Brodersen O.* Optimierung und Simulation. Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, 2004. — 315 p.
- Ekren B. Y., Evans G. W., Heragu S. S., Usher J. S.* Simulation-based performance improvement of a defense logistics warehouse // *International Material Handling Research Colloquium (IMHRC)*. — 2012. — P. 1–10.
- Ekren Y. B., Heragu S. S.* Simulation based optimization of multi-location transshipment problem with capacitated transportation // *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*. — 2008. — P. 2632–2638.
- Eskandari H., Darayi M., Geiger D. Ch.* Using simulation optimization as a decision support tool for supply chain coordination with contracts // *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*. — 2010. — P. 1306–1317.
- Eskandari H., Mahmoodi E., Fallah H., Geiger Ch.D.* Performance analysis of commercial simulation-based optimization packages: Optquest und Witness Optimizer // *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*. — 2011. — P. 2363–2773.
- Fu M. C., Glover F. W., April J.* Simulation optimization: a review, new development, and applications // *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*. — 2005. — P. 237–251.
- Grewal S. Ch., Enns T. S., Rogers P.* Performance effects of setup time reduction with and without decision variable re-optimization: a simulation-optimization study // *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. — 2009. — P. 2135–2144.
- Hachicha W., Ammeri A., Masmoudi F., Chachoub H.* A comprehensive literature classification of simulation optimisation methods // *MPRA Paper*. — No. 27652. — 2010. — P. 1–13.
- Hajnal E., Kollar G.* Optimization of food logistics by simulation technique // *Hungarian journal of industrial chemistry Veszprem*. — Vol. 33 (1–2). — 2005. — P. 105–111.
- Hong J. L., Nelson B. J.* A brief instruction to optimization via simulation // *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. — 2005. — P. 75–85.
- Law A. M., McComas M. G.* Simulation-based optimization // *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. — 2000. — P. 46–49.
- Liu J., Li Ch., Yang F., Wan H.* Production planning for semiconductor manufacturing via simulation optimization // *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*. — 2011. — P. 3617–3627.
- Molnár B.* Planning of order picking processes using simulation and a genetic algorithm in multi-criteria scheduling optimization // *Proceedings 16th European Simulation Symposium*. — 2004. — P. 1–6.
- OptQuest for Crystall Ball 2000. User manual. Developed: OptTek Systems, 2000. — P. 206.
- Pichitlamken P., Nelson B. L.* Optimization via simulation: a combined procedure for optimization via simulation // *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. — 2002. — P. 292–300.
- Queirolo F., Tonelli F., Schenone M., Nan P., Zunino I.* Warehouse layout design: minimizing travel time with a genetic and simulative approach — methodology and case study // *Proceedings 14th European Simulation Symposium*. — 2002. — P. 1–5.
- Ramírez Ríos D., Ramírez Polo L., Jimenez Barros M., Castro Bolaño L., Maldonado Erik.* The design of a real-time warehouse management system that integrates simulation and optimization models with RFID technology // *The International Journal of Computer Science & Applications (TIJCSA)*. — Vol. 2. — No. 04. — 2013. — P. 18–37.
- Ramírez Ríos D. G., Ramírez Polo L. E., Castro Bolaño L. J., Jimenez Barros M. A., Manotas Romero L. P.* RFID implementation and simulation-based system dynamics for optimizing warehousing strategies under multiple criteria // *TenthLACCEI Latin American and Caribbean Con-*

ference (LACCEI'2012), Megaprojects: Building infrastructure by fostering engineering collaboration, efficient and effective integration and innovative planning. — 2012. — P. 162–171.

Seijo-Vidal L. R., Bartolomei-Suarez M. S. Testing line optimization based on mathematical modeling from the metamodels obtained from a simulation // Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. — 2010. — P. 1739–1749.

Zvirgzdina B., Tolujevs J. Simulation-based methaheuristic optimization of logistics systems // Proceedings of the 12th International Conference «Reliability and Statistics in Transportation and Communication». — 2012. — P. 221–226.