

УДК 65.012.34:004.94

О. Е. ФЕДОРОВИЧ, К. О. ЗАПАДНЯ, Н. В. ЕРЕМЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ И КОНФИГУРИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТРИБЬЮЩИЙ

Ставится и решается задача исследования транспортной и дистрибутивной логистик для анализа движения продукции от производителя к потребителям с использованием транспортной сети и распределительных центров дистрибуций (РЦД). Задача решается в два этапа. На первом этапе осуществляется структуризация и оптимизация сети РЦД с использованием целочисленного линейного программирования с булевыми переменными. На втором этапе путем имитационного агентного моделирования уточняются основные показатели бытовой логистики (стоимость, время, стоимость обслуживания РЦД, риски).

**Ключевые слова:** дистрибуция, бытовая логистика, оптимизация структуры сети сбыта, агентное моделирование, целочисленная оптимизация.

### Введение

В настоящее время большое внимание уделяется логистике сбыта (дистрибуции) продукции предприятий, которая определяет сроки поставки товаров на рынок, а также оценивает возможные затраты, связанные с транспортными перевозками грузов. Поэтому актуальна тема предлагаемой публикации, в которой рассматривается вопрос рационального конфигурирования и оптимизации логистической системы сбыта.

### Постановка задачи исследования

В современных поставках продукции на рынок большое внимание уделяется конфигурированию поставок путем создания рациональной сети распределительных центров дистрибуции (РЦД), где осуществляется складирование и последующая отправка грузов потребителю [1, 2].

РЦД связаны между собой и потребителями продукции транспортными артериями (железная дорога, автодороги, морские пути и т.д.). Количество РЦД, а также используемые транспортные сети и достаточно большие расстояния между РЦД и потребителями продукции предприятий влияют на стоимость, время доставки, а также риски доставки грузов [3]. Предлагается задачу поиска рациональных конфигураций логистической системы сбыта продукции решать в два этапа [4, 5].

На первом этапе (структуризация) решается задача выбора архитектуры распределенной сети РЦД. При этом учитывается количество РЦД, их местоположение и транспортные связи между ними. Задача решается с учетом задаваемого набора критериев

(стоимость, время, риски доставки, стоимость обслуживания РЦД) на основе целочисленного линейного программирования с булевыми переменными.

На втором этапе решается задача параметрической оптимизации с использованием методов имитационного (агентного) моделирования [6, 7, 8].

### Решение задачи исследования

**1. Первый этап.** Оценивание и сравнение возможных вариантов сети РЦД будем осуществлять с помощью следующих критериев:

С – стоимость доставки грузов потребителям;

Т – время доставки грузов потребителям;

К – стоимость обслуживания РЦД;

Р – значение риска доставки грузов потребителям.

Для решения задачи структурной оптимизации будем использовать методы целочисленного линейного программирования. Введем следующую булеву переменную:  $x_{ij} \in \{0, 1\}$ , где  $x_{ij} = 0$  означает, что для  $j$ -го варианта сетевой структуры РЦД выбран  $i$ -ый маршрут доставки продукции потребителю;  $j = \overline{1, S}$ , где  $S$  – количество возможных архитектурных решений сети РЦД, которое задается специалистами по транспортной и распределительной логистике;  $i = \overline{1, M}$ , где  $M$  – количество возможных вариантов маршрута доставки продукции потребителю в рассматриваемой  $j$ -ой архитектуре сети РЦД.

При этом вводятся следующие ограничения на  $x_{ij}$ :

$$\sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^M x_{ij} = 1,$$

что означает, что в результате поиска мы должны остановиться на конкретной архитектуре сети РЦД и маршруте доставки продукции потребителям.

С учетом введенной булевой переменной  $x_{ij}$  выше предложенные критерии будут выглядеть следующим образом:

$$C = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} c_{ij} x_{ij}, \quad T = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} t_{ij} x_{ij},$$

$$K = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} k_{ij} x_{ij}, \quad R = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} r_{ij} x_{ij}.$$

Здесь  $c_{ij}$  – стоимость доставки продукции потребителю для  $j$ -ой архитектуры сети РЦД и  $i$ -го варианта маршрута доставки грузов;  $t_{ij}$  – время доставки продукции потребителю для  $j$ -ой архитектуры сети РЦД и  $i$ -го варианта маршрута;  $k_{ij}$  – стоимость обслуживания РЦД для  $j$ -ой архитектуры сети РЦД и  $i$ -го варианта маршрута;  $r_{ij}$  – значение риска доставки груза потребителю для  $j$ -ой архитектуры сети РЦД и  $i$ -го варианта маршрута.

Проведем, в начале, оптимизацию по отдельным (локальным) критериям, а затем по обобщенному показателю (свертка локальных критериев).

1.1. Необходимо минимизировать стоимость доставки грузов потребителю:

$$\min C, \quad C = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} c_{ij} x_{ij}$$

с учетом ограничений:  $T \leq T_{\text{доп}}, \quad K \leq K_{\text{доп}}, \quad R \leq R_{\text{доп}}$ , где  $T_{\text{доп}}, K_{\text{доп}}, R_{\text{доп}}$  – допустимые значения критериев.

1.2. Необходимо минимизировать время доставки грузов потребителю:

$$\min T, \quad T = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} t_{ij} x_{ij}$$

с учетом ограничений:  $C \leq C_{\text{доп}}, \quad K \leq K_{\text{доп}}, \quad R \leq R_{\text{доп}}$ , где  $C_{\text{доп}}$  – допустимые значения критерия стоимости  $C$ .

1.3. Необходимо минимизировать стоимость обслуживания сети РЦД,  $\min K$ ,  $K = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} k_{ij} x_{ij}$  с

учетом ограничений:  $C \leq C_{\text{доп}}, \quad T \leq T_{\text{доп}}, \quad R \leq R_{\text{доп}}$ .

1.4. Необходимо минимизировать риски доставки грузов потребителю:

$$\min R, \quad R = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} r_{ij} x_{ij}$$

с учетом ограничений:  $C \leq C_{\text{доп}}, \quad T \leq T_{\text{доп}}, \quad K \leq K_{\text{доп}}$ .

1.5. Для решения многокритериальной задачи оптимизации воспользуемся простейшей аддитивной сверткой критериев, представленной в виде обобщенного критерия  $W$ :

$$W = \alpha_c \hat{C} + \alpha_t \hat{T} + \alpha_k \hat{K} + \alpha_r \hat{R},$$

где  $\alpha_c, \alpha_t, \alpha_k, \alpha_r$  – «веса» соответствующих критериев,  $\sum_{e=1}^4 \alpha_e = 1$ , которые задаются экспертами в области сбытовой и транспортной логистики;

$\hat{C}, \hat{T}, \hat{K}, \hat{R}$  – пронормированные значения критериев  $C, T, K, R$  с использованием единой безразмерной шкалы  $0 \div 1$ :

$$\hat{C} = \frac{C - C^*}{C_{\text{доп}} - C^*}, \quad \hat{T} = \frac{T - T^*}{T_{\text{доп}} - T^*},$$

$$\hat{K} = \frac{K - K^*}{K_{\text{доп}} - K^*}, \quad \hat{R} = \frac{R - R^*}{R_{\text{доп}} - R^*},$$

где  $C^*, T^*, K^*, R^*$  – минимальные значения критериев, полученные в результате решения локальных задач оптимизации 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4.

Необходимо минимизировать обобщенный критерий  $W$ :

$$\begin{aligned} \min W &= \alpha_c \hat{C} + \alpha_t \hat{T} + \alpha_k \hat{K} + \alpha_r \hat{R} = \\ &= \alpha_c \frac{C - C^*}{C_{\text{доп}} - C^*} + \alpha_t \frac{T - T^*}{T_{\text{доп}} - T^*} + \\ &+ \alpha_k \frac{K - K^*}{K_{\text{доп}} - K^*} + \alpha_r \frac{R - R^*}{R_{\text{доп}} - R^*} = \\ &= \frac{\alpha_c}{C_{\text{доп}} - C^*} \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} c_{ij} x_{ij} + \frac{\alpha_t}{T_{\text{доп}} - T^*} \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} t_{ij} x_{ij} + \\ &+ \frac{\alpha_k}{K_{\text{доп}} - K^*} \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} k_{ij} x_{ij} + \frac{\alpha_r}{R_{\text{доп}} - R^*} \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^{M_j} r_{ij} x_{ij} - \\ &- \frac{\alpha_c \cdot C^*}{C_{\text{доп}} - C^*} - \frac{\alpha_t \cdot T^*}{T_{\text{доп}} - T^*} - \frac{\alpha_k \cdot K^*}{K_{\text{доп}} - K^*} - \frac{\alpha_r \cdot R^*}{R_{\text{доп}} - R^*} \end{aligned}$$

с учетом ограничений  $C \leq C_{\text{доп}}, \quad T \leq T_{\text{доп}}, \quad K \leq K_{\text{доп}}, \quad R \leq R_{\text{доп}}$ .

**2. Второй этап.** Рациональные варианты сбытовой сети РЦД, полученные на первом этапе необходимо исследовать в динамическом аспекте для более точной оценки транспортировки и доставки грузов потребителям (параметрическая оптимизация). Для оценки транспортировки грузов воспользуемся имитационным событийным моделированием

ем с применением агентного представления основных составляющих сбыта продукции.

Введем следующие агенты для моделирования сбыта:

2.1. Агент «Транспортировка» (ТР) служит для моделирования заявок (грузов), которые движутся по транспортным отрезкам сети между отдельными РЦД и потребителями продукции.

2.2. Агент «Генератор заявок» (ГЗ) служит для имитации появления заявок (грузов) в сети РЦД для дальнейшего продвижения к потребителям продукции.

2.3. Агент «Диспетчер» (Д) служит для формирования маршрутов движения заявок (грузов) после появления их на выходе ГЗ, а также генерирует отчет, который содержит фактические показатели, полученные в результате моделирования.

2.4. Агент «Консолидатор» (КР) служит для объединения заявок (грузов) в сложную заявку (партию грузов) в отдельных РЦД.

2.5. Агент «Склад» (СД) служит для формирования очереди заявок (грузов) в отдельных РЦД.

2.6. Агент «Потребитель» (П) служит для имитации поступления заявок (грузов), которые прошли через сеть РЦД конкретному потребителю.

2.7. Агент «РЦД» является сложным агентом, включающим агенты «Консолидатор» и «Склад». В случае отсутствия консолидации грузов агент «РЦД» представляется в виде «Склада».

2.8. Агент «Риск» (Р) служит для имитации непредвиденных (случайных) ситуаций при движении грузов в сети РЦД, которые приводят к остановкам в процессе движения заявок, а значит к увеличению времени доставки и ухудшению всех основных показателей сбыта продукции.

На рис. 1 представлена структурная схема агентной имитационной модели сбыта продукции.

Кратко остановимся на описании механизма имитационного агентного моделирования. Агенты «Генераторы заявок» формируют грузы (продук-

цию) в виде последовательности заявок. Одна заявка характеризует одиночный груз, который может двигаться в унифицированной таре (например, контейнер). Далее, в зависимости от маршрута движения заявок, который формирует «Диспетчер», используя агенты «Транспортировка», происходит продвижение заявок к агентам «РЦД», где осуществляется складирование (агенты «Склад») и, если требуется, консолидация грузов (агенты «Консолидация»). При движении грузов с использованием цепи агентов «РЦД» привлекаются несколько агентов «Транспортировка». Агентам «Потребитель» грузы поступают с помощью агентов «Транспортировка».

В ходе моделирования фиксируются моменты времени поступления заявок (грузов) в агенты «РЦД», а также моменты времени выхода заявок (грузов) из агентов «РЦД» и поступления заявок (продукции) агентам «Потребитель». Возникновение очередей заявок связано с формированием заявок в агентах «Склад», которые ожидают начала движения к последующим агентам «РЦД» или условий консолидации грузов с использованием агентов «Консолидация».

Генераторы рисков (агенты «Риск») позволяют имитировать случайные сбои в процессе движения заявок в сети РЦД.

В результате моделирования формируются фактические показатели движения грузов потребителям в сети РЦД (стоимость, время, стоимость обслуживания, риски), которые сравниваются с планируемыми показателями.

Если результаты моделирования не удовлетворяют требованиям менеджеров по транспортной логистике и дистрибьюторам, то осуществляется итеративная (пошаговая) процедура исследования, где каждая последующая итерация формируется по результатам предыдущих. В результате многочисленных итераций полученные фактические параметры могут быть улучшены.

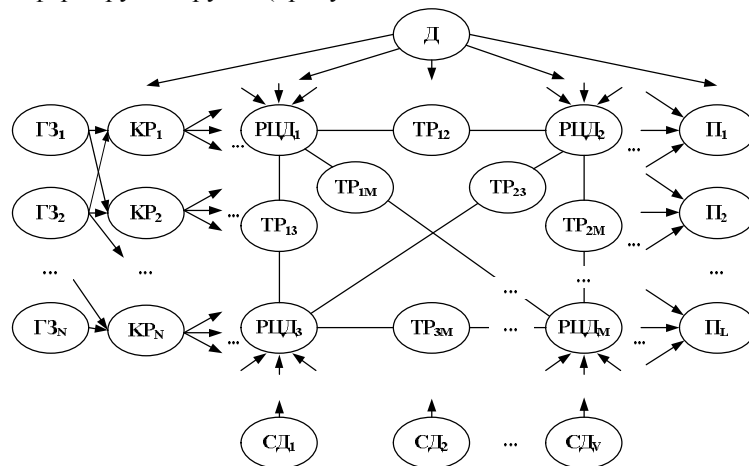


Рис. 1. Структурная схема агентной имитационной модели сбыта продукции

## Заключення

Предлагаемый подход целесообразно использовать на начальных этапах проектирования или модернизации сети РЦД, когда необходимо провести структуризацию и оптимизацию с целью минимизации транспортных и сбытовых издержек при движении грузов к потребителям продукции.

## Литература

1. Дыбская, В. В. Управление складированием в цепях поставок [Текст] / В. В. Дыбская. – М.: Издательство «Альфа-Пресс», 2009. – 720 с.
2. Теклин, Б. Зонирование регионального дистрибуционного центра автозапчастей [Текст] / Б. Теклин // *Логистика*. – 2012. – № 2. – С. 24-26.
3. Бродецкий, Г. Выбор способа организации работы распределительного центра торговой компании при многих критериях в условиях риска [Текст] / Г. Бродецкий, К. Игнашенков // *Логистика*. – 2013. – № 3. – С. 24-31.

4. *Геопространственные производственные системы. Часть I. Анализ, моделирование, проектирование: моногр. [Текст] / В. М. Илюшко, О. Е. Федорович, О. Н. Замирец, Л. Д. Греков. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харк. авиац. ин-т», 2011. – 250 с.*

5. Меламедов, Б. Комплексное управление складом, дистрибуцией и торговлей [Текст] / Б. Меламедов // *Логистика*. – 2013. – № 1. – С. 24-25.

6. Суслов, С. Имитационная модель – уже вполне обычная составная часть логистических проектов [Текст] / С. Суслов // *Логистика*. – 2012. – № 2. – С. 22.

7. Суслов, С. А. Агентное моделирование как средство анализа и прогноза спроса на энергоресурсы [Текст] / С. А. Суслов, М. А. Кондратьев, К. В. Сергеев // *Проблемы управления*. – 2010. – № 2. – С. 46-52.

8. Чиркунов, К. С. Агентное моделирование развития территориальной системы [Текст] / К. С. Чиркунов // *Информатика и ее применение*. – 2011. – Т. 5. – Вып. 1. – С. 58-64.

*Поступила в редакцию 20.11.2013, рассмотрена на редколлегии 11.12.2013*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., профессор кафедры инженерии программного обеспечения И. В. Шостак, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

## МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА КОНФІГУРУВАННЯ ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДИСТРИБ'ЮЦІЇ

*О. Є. Федорович, К. О. Западня, Н. В. Єременко*

Ставиться і вирішується задача дослідження транспортної та дистрибутивної логістик для аналізу руху продукції від виробника до споживачів з використанням транспортної мережі і розподільних центрів дистрибуції (РЦД). Задача вирішується в два етапи. На першому етапі здійснюється структуризація та оптимізація мережі РЦД з використанням цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними. На другому етапі шляхом імітаційного агентного моделювання уточнюються основні показники збутової логістики (вартість, час, вартість обслуговування РЦД, ризики).

**Ключові слова:** дистрибуція, збутова логістика, оптимізація структури мережі збуту, агентне моделювання, цілочисельна оптимізація.

## MODEL OPTIMIZATION AND LOGISTICS SYSTEM CONFIGURATION DISTRIBUTION

*O. E. Fedorovich, K. O. Zapadnya, N. V. Eremenko*

The problems of transport research and distributive logistics for the analyses of moving products to consumers using the transport network and distribution centers (DC) are determined and solved. The problem is solved in two stages. At the first stage the structuring and optimization of the DC network using integer linear programming with Boolean variables is implemented. In the second stage by agent-based simulation modeling the main indicators of distribution logistics (cost, time, cost of maintenance of DC, the risks) are clarified.

**Keywords:** distribution, marketing logistics, optimization of the structure of the sales network, agent-based modeling, integer optimization.

**Федорович Олег Евгеньевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Западня Ксения Олеговна** – канд. техн. наук, науч. сотр. каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Єременко Наталія Валентинівна** – мл. науч. сотр. каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: khai302@ukr.net.