

УДК 658.7

А. Ю. Тюрин

ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ ТОВАРОВ

Сегодня доставка груза является жизненно важной деятельностью для всех компаний, городов и регионов, неотъемлемой частью и связующим звеном между всеми участниками распределения товаров, начиная системой снабжения и заканчивая конечными потребителями.

При решении задач логистического обслуживания потребителей в городах нельзя не учитывать основные проблемы грузового автотранспорта. К ним относятся:

- возникновение заторов на дорогах города;
- нехватка нужной инфраструктуры и парковочных мест;
- низкий коэффициент загрузки трансп. средств;
- политика доставки «точно в срок».

На региональном уровне к ним добавляются проблемы установления периодичности доставки продукции, сбалансированности графиков работы водителей, управления парком порожних автотранспортных средств.

Поэтому возникает необходимость оптимизации перевозок с целью уменьшения присутствия грузового транспорта на дорогах и одновременно увеличения загрузки транспортных средств грузоперевозчиков и снижения всех расходов по цепи доставки продукции потребителям.

Эксплуатация автотранспорта в городах должна вписываться в концепцию городской логистики [1], которая предполагает решение ряда задач доставки продукции преимущественно с использованием городских распределительных и логистических центров.

В этом случае инновационным подходом будет использование мультиэшелонной системы доставки продукции, когда автотранспорт обслуживает клиентов в ограниченном радиусе доставки и по «эстафете» передает товар от одного эшелона к другому, вплоть до эшелона конечных потребителей. Частным случаем данной системы распределения продукции будет двухэшелонная система доставки грузов, пример использования которой на региональном уровне отражен в [2].

В городских условиях при планировании доставки учитываются ограничения и условия влияния жизнедеятельности города на грузовое движение автотранспорта, отмеченные выше.

Задача планирования системы грузоперевозок вовлекает разные участвующие стороны и уровни решений, т.е. принимаются стратегические решения, связанные с выбором местоположения погрузочных пунктов, и тактические решения, связанные с выбором маршрута для транспортного средства.

В работах по исследованию операций, как правило, отдельно рассматриваются три разных уровня планирования (стратегический, тактический и оперативный), и только в немногих случаях они рассматриваются в совокупности. Главные задачи для каждого уровня были сопоставлены с хорошо известными задачами, широко рассматриваемыми в литературе с точки зрения моделирования и алгоритма. Стратегические решения часто включают задачи размещения пунктов обслуживания, в том числе и терминалов и проектирование сети доставки товаров, тактические решения включают задачи маршрутизации и составление расписания работы транспортного средства, и, наконец, решения оперативного уровня включают частные задачи выбора маршрутов доставки, составления расписаний движения транспортных средств и порядка обслуживания клиентов.

В дальнейшем остановимся на задаче совокупной стратегическо-тактической разработки двухступенчатой системы грузоперевозок. Целью является определение структуры ранее представленных двухступенчатых систем грузоперевозок, направленных на оптимизацию расположения и число двух видов погрузочных пунктов (платформы и дополнительные склады), размеров двух видов автопарка (автомобили большой и малой грузоподъемности) и соответствующих маршрутов на каждой ступени.

Таким образом, задача была смоделирована как двухступенчатая (многоуровневая) задача размещения и маршрутизации. Данные задачи являются NP-трудными, поскольку они возникают из комбинации двух NP-трудных задач: задачи размещения и задачи маршрутизации. Даже в самых лучших исследованиях многоуровневые задачи размещения и маршрутизации еще не рассматривались ни точными, ни эвристическими методами.

Модели одно- и многоуровневого расположения пункта отправки товара широко применялись в литературе для описания систем грузоперевозок. Обычно, но не во всех случаях, предполагается, что транспортные расходы представляют собой линейную функцию прямолинейного (или радиального) расстояния между складом и конечным потребителем. Это основано на предположении, что каждый клиент обслуживается полностью загруженным транспортом, который выполняет заранее определенный маршрут, где стоимость перевозки приблизительно выражено посредством прямолинейного расстояния от склада. Целью решения задачи является минимизация суммы затрат на размещение или транспортировку.

При этом предполагается, что каждый клиент обслуживается на прямом и обратном пути, а возможность функционирования маршрутов с несколькими промежуточными остановками не принимается в расчет. Это условие оказалось эффективным в контексте, где будущий спрос клиента неизвестен или очень изменчив, но с другой стороны, он имеет несколько ограничений. Фактически, существует несколько практических ситуаций, где приближение транспортных затрат к затратам на размещение значительно влияет на работу системы, а следовательно, важно принимать в расчет все значения решений и их взаимозависимость, т.е.: расположение одного или более пунктов отправки товара влияет одновременно на размещение транспортных средств до этих пунктов и на продолжительность маршрутов, в т.ч. с большим количеством клиентов (маршруты с несколькими остановками).

Следовательно, в этих случаях решения задач размещения и маршрутизации сильно взаимосвязаны и должны быть смоделированы и оптимизированы одновременно. Попытки решить данные задачи с допущением округления затрат на маршруты с несколькими остановками были предприняты в [3 - 9].

Многоуровневая система грузоперевозок состоит из нескольких уровней, а продукция поступает с верхних уровней на следующие уровни один за другим и так до конечного потребителя. Наиболее часто встречаются три уровня [10], определенные соответственно как *исходные пункты отправки* p , *промежуточные пункты* s и *конечные потребители* z . В дальнейшем будем ссылаться на подсистему из двух последующих уровней всей системы, используя термин *ступень*, а следовательно, одинаково будем использовать формулировки *многоуровневая* или *многоступенчатая* задача размещения и маршрутизации.

Задача размещения и маршрутизации в своей обычной форме связана с одноступенчатым случаем размещения и маршрутизации, т.е. состоит в нахождении:

1. размещения определенного количества промежуточных пунктов s , в конечном счете, с ограниченной грузоподъемностью, из множества допустимых размещений S ;
2. числа транспортных средств, используемых для доставки;
3. маршрута, при котором транспортное средство, размещенное в одном пункте отправки, может обслужить подмножество конечных клиентов z из множества всех клиентов Z .

Каждый конечный потребитель имеет спрос и каждое транспортное средство характеризуется ограниченной грузоподъемностью. Затраты си-

стемы состоят из затрат на размещение промежуточных пунктов, затрат на транспортировку и затрат на использование транспортного средства.

Одноступенчатая задача маршрутизации и размещения может быть обобщена для того, чтобы рассматривать систему сбыта с несколькими взаимодействующими уровнями, причем все вовлечены в решение задачи маршрутизации и размещения. Для этой цели в [10] автор дал формулировку задачи размещения и маршрутизации и классификацию для них.

Определены два возможных вида маршрута с одного уровня на другой:

R рейс: маятниковый рейс, связывающий одного клиента и один пункт отправки товара;

T рейс: круговой рейс, связывающий несколько клиентов и/или пунктов отправки товара.

Основываясь на эти формулировки, в [10] введена следующая формула для синтетического представления основных характеристик задачи размещения и маршрутизации: $X | M_1 | \dots | M_{X-1}$, где X является количеством уровней, а $M_1 | \dots | M_{X-1}$ - тип рейсов между двумя следующими друг за другом уровнями. Тогда, например, формулой $3 | R | T$ говорится о задаче с тремя уровнями, R рейсами между первым и вторым уровнем (первая ступень) и T рейсами между вторым и третьим уровнем (вторая ступень).

Идея объединения двух уровней решения, стратегического и тактического, для системы грузоперевозок решалась во многих работах, например в [11, 12, 13].

В [12] авторы предложили эвристику для решения задачи с ограничениями на продолжительность маршрутов. Они использовали итеративный подход «сначала размещение, затем маршрут», где затраты на обслуживание клиентов обновляются на каждой итерации. Фаза размещения определяется с помощью множителей Лагранжа, в то время как фаза маршрутизации с помощью эвристики локального поиска.

В [13] авторы изучили задачу разработки сети комплексного сбыта. Они рассмотрели задачу, где два разных типа пунктов отправки товара должны быть расположены на иерархически упорядоченных уровнях. Продукция доставляется с первого уровня на второй через R рейсы, и разные транспортные средства осуществляют доставку продукции между вторым и третьим уровнями, а между третьим уровнем и клиентами через T рейсы. Таким образом, в отличие от предыдущих рассмотренных задач, они должны решить двойственную задачу маршрутизации и размещения. Они предложили разные формулировки задачи для статической средней гармонической постановки и динамической постановки.

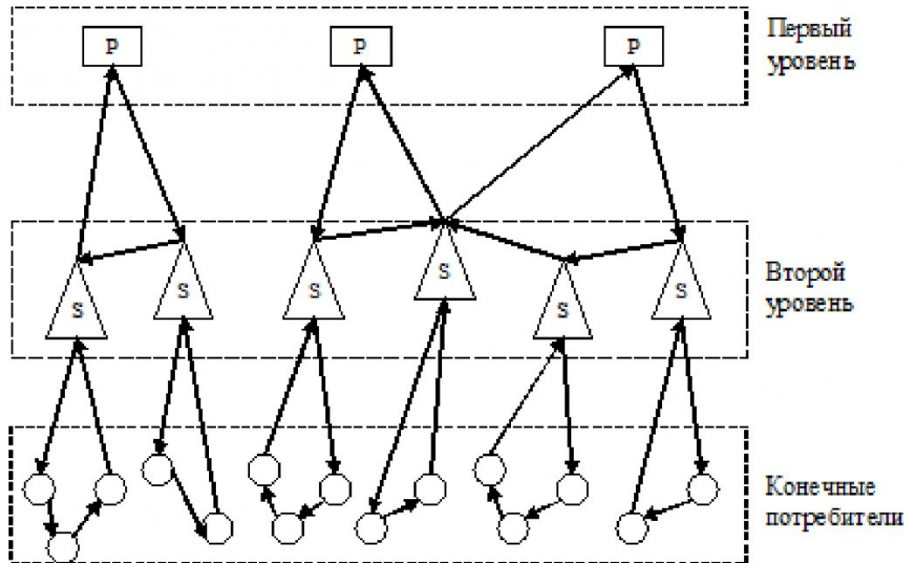


Рис.1 – Схема двухэшелонной системы доставки

Как сказано выше, размещение и маршрутизация является стратегически тактической задачей, где решения многоуровневого расположения с ограниченной пропускной способностью интегрируются с решениями маршрутизации и размерами автопарка.

Рассматриваемая задача представляет собой разработку двухступенчатой системы грузоперевозок для одного типичного товара. Основанная на ранее представленной системе чисел, задача может рассматриваться как 3//Т/Т. В дальнейшем будем изображать пункты отправки товара как исходные и второстепенные, или терминами «платформы» и «дополнительные склады» как в работе [14].

Модель двухэшелонной системы доставки описывается через многоуровневую сеть $G(N,A)$, в которой множество узловых точек состоит из трех подмножеств, одно для каждого уровня: исходные пункты $P = \{p\}$ (или логистические центры, платформы) (1-й уровень), второстепенные $S = \{s\}$ (дополнительные склады) (2-й уровень) и конечные потребители $Z = \{z\}$ (3-й уровень) (см. рисунок 1).

Продукция имеется в наличии на платформах P в ограниченных количествах. Продукция комплектуется и перевозится на автомобилях большой грузоподъемности, которые обслуживают дополнительные склады S . На складах S продукция перегружается на автомобили малой грузоподъемности и доставляется конечному потребителю Z . Предполагается, что спрос на типичный для каждого клиента продукт заранее известен, и платформы всегда готовы удовлетворить весь спрос.

Рассматриваются следующие соединения между двумя смежными уровнями:

- маршрут от исходного пункта P до второстепенного S - *маршрутизация первой ступени*;

- маршрут от второстепенного пункта S до потребителя Z - *маршрутизация второй ступени*.

Доставка осуществляется на двух видах грузовых автомобилей различной грузоподъемности:

- *автомобили большой грузоподъемности*: они являются *транспортом первой ступени* и заняты доставкой укомплектованной продукции с платформы на дополнительный склад.

- *автомобили малой грузоподъемности*: это *транспорт второй ступени* для доставки от второстепенного склада до потребителя.

С физической точки зрения система действует следующим образом. В соответствии с фактическим спросом груз прибывает во внешнюю зону, где его комплектуют на автомобили большой грузоподъемности до их полной загрузки, каждому автомобилю назначают время отправления и маршрут с заходом на один или несколько дополнительных складов. На складе груз перегружается на автомобили малой грузоподъемности, каждый автомобиль объезжает своих клиентов и возвращается на склад для выполнения следующего цикла операций.

Очевидно, в данной системе возникают дополнительные затраты на перегрузку товара. В любом случае эти затраты компенсируются, пусть и частично, формированием партий грузов и сокращением порожних рейсов, а также экономией масштаба во время осуществления перевозок.

В [14] представлены экспериментальные результаты решения задачи точными и эвристическими методами на ЭВМ с процессором Intel Pentium 4 (2.40 GHz, RAM 4.00 GB).

Был сгенерирован 21 тестовый пример. В таблице представлены сравнительные данные по решению тестовых примеров, в которых сам пример закодирован от 3 до 5 цифр, где первая цифра – число платформ (объектов первого уровня), одна или две следующие цифры – число промежуточ-

Таблица Сравнительные показатели решения задач двухэшелонной системы доставки различными методами

Пример	Точный метод		Эвристический метод		Отклонение
	Общие затраты, у.е.	Время решения, с.	Общие затраты, у.е.	Время решения, с.	
238	591,83	10,23	591,83	0,39	0%
239	878,69	9,87	902,45	0,43	3%
248	625,96	175,6	625,96	0,85	0%
2410	862,91	582,9	862,91	0,85	0%
2415	1105,67	1470	1121,5	1,92	1%
3510	829,25	2195	952,86	1,25	15%
3515	1019,57	3894	1068	2,21	5%
2820	737,57	7200	1114,41	5,28	51%
2825	580	7200	1021,69	4	76%
21015	554,71	7200	754,63	1,53	36%
21020	595	7200	1008,17	3,4	69%
21025	301,71	7200	1085,67	6,81	260%
3810	604,37	4982	604,37	1,24	0%
3815	515	7200	730,36	1,61	42%
3820	351	7200	968,59	5,54	176%
3825	275	7200	943,25	7,65	243%
31015	435	7200	744,57	2,35	71%
31020	398,02	7200	979,07	4,55	146%
31025	590	7200	1131,59	3,94	92%
41020	571,21	7200	1287,14	9,49	125%
41025	715,75	7200	1588,95	45,01	122%

ных складов (объектов второго уровня) и последние одна или две цифры – число конечных потребителей. Таким образом, 21015 относится к примеру с 2 платформами, 10 промежуточными складами и 15 потребителями. В качестве точного метода использовался метод ветвей и границ, а в качестве эвристического – метод поиска с запретами. При решении точным методом было введено ограничение на время выполнения расчета до 7200 секунд, после чего поиск наилучшего решения останавливается.

Для наглядности результаты решения задач точным и эвристическим методом представлены на рисунке 2. Анализ результатов таблицы и рисунка 2 показывает, что для небольших примеров (до 3 платформ, 5 промежуточных складов и 15 потребителей) решения точным и эвристическим методом почти не отличаются, либо отличаются незначительно. При этом время решения задачи эвристическим методом значительно ниже, чем при решении точным методом.

При рассмотрении средних и больших примеров (т.е. более, чем 20 потребителей) наблюдается существенное расхождение результатов расчета между точным и эвристическим методом при существенной экономии времени получения результата эвристическим методом по сравнению с точным. Следовательно, необходимо установление предельных границ в соотношении «качество решения/время расчета» с целью получения приемлемого результата за подходящее время.

Выводы

1. В условиях перегруженных городских магистралей и улиц, нехватки парковочных мест, высокой плотности транспортного потока и множественных ограничений на проезд автомобилей большой грузоподъемности особенно в центр города применение многоступенчатой (многоэшелонной) системы доставки товаров потребителям позволит обойти эти ограничения и повысить скорость доставки груза.

2. Наиболее простой системой городского обслуживания потребителей является двухэшелонная система доставки товаров, предусматривающая концентрацию первого уровня складов (платформ) на периферии города, принимающих значительные потоки грузов по междугородным магистралям и передающим их на промежуточные склады, расположенные ближе к потребителям.

3. В данной системе доставки продукции происходит дифференциация работы автотранспорта: автомобили большой грузоподъемности - на участке «платформа-промежуточный склад», а автомобили малой грузоподъемности – на участке «промежуточный склад-конечный потребитель».

4. В качестве платформ могут выступать распределительные склады, а в качестве промежуточных складов – логистические центры, имеющие значительные площади, большое количество дверей для приема/отпуска товаров на автомобили для их дальнейшей доставки, высокотехнологичное складское оборудование, систему автоматизированного учета и хранения товаров.



Рис.2 – Сравнение результатов решения задачи двухэшелонной системы доставки

5. Решение задачи двухэшелонной системы доставки товаров основано на совместном решении двух отдельно трудных задач – задачи размещения объектов обслуживания и задачи маршрутизации транспортных средств особенно при большом количестве потребителей. При решении этой совместной задачи точными методами время получения результата растет экспоненциально в

зависимости от размерности задачи, а при решении эвристическими методами ухудшается качество решения при незначительных затратах времени ЭВМ. Следовательно, необходимо установление предельных границ в соотношении «качество решения/время расчета» с целью получения приемлемого результата за подходящее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрин, А.Ю. Городские распределительные центры в концепции городской логистики // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 1. – С. 146-148.
2. Тюрин, А.Ю., Зырянов В.В. Двухэшелонная система доставки продукции предприятий пищевой промышленности // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 2. – С. 124-127.
3. Webb M.H.J. Computer Scheduling of Vehicles from One or More Depots to a Number of Delivery Points. // Operation Research Quarterly. – 1972. – 23. – P. 333-344.
4. Christofides N., Eilon S. Expected distances in distribution problems. // Operational Research Quarterly. – 1969. – 20. – P. 437-443.
5. Eilon S., Watson-Gandy C.D.T., Heilbron A. A vehicle fleet costs more. // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. – 1971. – 3. – P. 126-132.
6. Wren A., Holiday A. Cost Functions in the Location of Depots for Multiple-Delivery Journeys. // Operation Research. – 1968. – 19. – P. 311-320.
7. Perl J., Daskin M.S. A warehouse location-routing problem. // Transportation Research Part B. – 1985. – 19. – P. 381-396.
8. Salhi S., Rand G. Theory and methodology. The effect of ignoring routes when locating depots. // European journal of operational research. – 1989. – 39. – P. 150-156.
9. Chien T.W. Operational estimators for the length of a traveling salesman tour. // Computers and Operations Research. – 1992. – 19. – P. 469-478.
10. Laporte G. Location-routing problems. // B.L. Golden. A.A. Assad. Vehicle routing: Methods and studies. – Amsterdam: North-Holland, 1988. – 438 p.
11. Jacobsen S.K., Madsen O.B.G. A comparative study of heuristics for a two-level location-routing problem. // European Journal of Operational Research. – 1980. – 5. – P. 378-387.
12. Bruns A., Klose A. A location first-route second heuristic for a combined location-routing problem. // U. Zimmermann, U. Derigs, W. Gaul, R. Mohring. Operations Research Proceedings. – Berlin: Springer, 1996. – 375 p.
13. Ambrosino D., Scutella M.G.: Distribution network design: New problems and related models. // European Journal of Operational Research. – 2005. – 165. – P. 610-624.
14. Crainic T.G., Ricciardi N., Storchi G. Advanced freight transportation systems for congested urban areas. // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2004. – 12. – P. 119-137.

Автор статьи:

Тюрин Алексей Юрьевич, докт. экон. наук, профессор каф. автомобильных перевозок. E-mail: alex-turin07@rambler.ru

Поступило в редакцию 25.12.2014