ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАКЕТОВ ТРАНСПОРТНЫХ УСЛУГ

Савушкин С.А.
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН
ssavushkin@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены факторы, управляющие действиями субъектов транспортного процесса при формировании и исполнении пакетов транспортных услуг. Приводятся математические определения, постановки задач, алгоритм моделирования пакетов заказов транспортных услуг. Ставится и решается задача минимизации парка транспортных средств и перемещений для выполнения заданного пакета заказов.

Ключевые слова: моделирование, транспорт, услуга, компания, каталог, качество, логистика, алгоритм, симплекс-метод, пакет

Введение

Выполнение комплексных транспортных услуг с высоким уровнем логистики требует согласованных действий нескольких компаний или подразделений компании. С другой стороны, процесс цифровой трансформации, переход к цифровой экономике и цифровому транспорту [1] предполагает изучение и систематизацию моделей и механизмов такого взаимодействия. Одним из направлений такого взаимодействия является декомпозиция сложных комплексных мультимодальных перевозок на простейшие базисные услуги и конструирование плана исполнения комплексной услуги. Другим направлением взаимодействия является группировка однотипных базисных услуг в пакеты услуг, исполнение которых может дать экономию, по сравнению с тем, если исполнять эти услуги по отдельности.

В работе [2] строятся модели потока движения в крупномасштабной мультимодальной транспортной сети, рассматриваются вопросы оптимизации ее производительность. В статье [3] рассматривается проблема транспортировки в мультимодальной сети с возможностью слияния и разделения потоков. Проблемы планирования и составления графиков для удовлетворения спроса на железнодорожные перевозки рассмотрены в [4]. Кроме этого, приведены алгоритмы объединения требований в блоки, закрепление блоков за поездами, вопросы функционирования звездообразной транспортной системы, состоящей из узлов и связывающих путей ([4]). В статье [5] рассмотрена проблема перераспределения порожних грузовых вагонов. Учитывается стоимость отправки вагонов из пункта отправления в пункт назначения, а также стоимость операций в узлах сети, которая зависит от количества отправленных групп вагонов. Проблемы размещения порожних вагонов, оптимизации размеров парка также рассматриваются в [6]. Предлагается задача целочисленного линейного программирования для определения оптимального компромисса между количеством грузовых вагонов и затратами, связанными с распределением порожних транспортных средств. Методы исследования операций применяются в [7] для решения задач устойчивого планирования в сложной транспортной системе. Решается задача перехода от начального пункта до пункта назначения через другие промежуточные пункты, через которые проходят маршруты между двумя пунктами. В многоцелевой задаче оптимизации лицо, принимающее решение, получает возможность эффективного выбора лучшего маршрута по компромиссу между критериями, такими, как минимизация стоимости перевозки, продолжительность перевозки, максимизация качества обслуживания и др.

Подходы к цифровой трансформации на транспорте, связанные с построением интеллектуального каталога транспортных услуг изложены в [8]. Там же излагаются вопросы конструирования каталога услуг и организации деятельности компании на принципах клиентоориентированности. Процесс передачи услуг в цифровой каталог является трудоемким и в [9] рассматриваются вопросы его оптимизации. Вопросы оптимизации структур управления, общие вопросы методологии, разработки и экспертизы больших транспортных и, в частности, железнодорожных систем рассматриваются в [10-11].

Проблемы, связанные с взаимодействием грузоотправителя с перевозчиком, с назначением и функциями логистических компаний, являются в настоящее время актуальными. Логистические компании (или соответствующие подразделения транспортно-логистических компаний), взаимодействуя с грузоотправителями, формируют пакеты комплексных мультимодальных транспортных услуг. После их декомпозиции и перегруппировки, совместно с перевозочными компаниями, они формируют пакеты базовых услуг, которые, далее, выполняются перевозчиками.

1 Формирование пакетов услуг

Взаимодействие грузоотправителей с перевозчиком при оказании комплексной транспортной услуги происходит с участием логистических компаний. Логистическая компания является исполнителем по отношению к грузоотправителю и заказчиком по отношению к перевозчику. В ее распоряжении имеются ресурсы интеллектуального каталога услуг, позволяющие грузоотправителю выбрать требуемую услугу и сделать заказ на ее выполнение, а логистической компании – произвести необходимые операции по формированию заказов для перевозчиков.

1.1 Основные формулы

Пусть имеется список $\{(w_i, t_i, u_i, v_i)\}$ заказов, где $i = \overline{1, n}$ – номер заказа, на перевозку грузов из пункта u_i в пункт v_i, который начинает выполняться в момент времени отправления t_i. Объем груза - w_i, n – число заказов. По заданным пунктам отправления и прибытия можно рассчитать дальность перевозки по формуле: $l_i = l_i(u_i, v_i)$.

В ходе взаимодействия исполнителя с заказчиком должны быть согласованы требования к стоимости перевозки груза и к показателям качества доставки груза. Показатели качества зафиксированы в нормативных документах. К ним относятся такие частные показатели как срочность доставки, отклонение от графика доставки, порча или частичная потеря груза, дополнительные сервисы, например, охрана, сопровождение, обслуживание сопровождающих, также размеры выплат по гарантийным обязательствам. Будем считать, что имеется функция предпочтений грузоотправителя $g_i = g_i(d_i, w_i, l_i, K_i)$, где d_i - стоимость заказа, l_i – расстояние перевозки, K_i – интегральный показатель качества исполнения услуги, полученный, например, сверткой всех частных показателей. Свои требования к качеству перевозки логистические компании вырабатывают на основе требований грузоотправителя. Стоимость заказа определяется рыночной ценой в ходе торгов исполнителя с заказчиком. Свои требования к стоимости перевозки логистические компании вырабатывают на основе требований перевозчиков.

Большему значению функции g_i соответствует более комфортные условия сделки, т.е. более желательный набор значений показателей стоимости и качества. Вид функции g_i зависит от предпочтений заказчика. В общем случае она не возрастает по первому аргументу и не убывает по последнему аргументу.

Пусть имеются m исполнителей. Будем считать, что для i–го заказа с j–м исполнителем предварительно согласованы (приняты к рассмотрению) значения стоимости d_{ij} и уровня качества K_{ij}. Необходимое условие того, что сделка для заказчика приемлема, задается неравенством: $g_i(d_{ij}, w_i, l_i, K_{ij}) \geq 0$. Таким образом, заказчик может выбрать исполнителя только, если он предложит такие условия. В противном случае, считаем, что заказчик отказался от данного исполнителя, например, выбрал другого исполнителя или другой вид транспорта.

Множество исполнителей J_i, которые удовлетворяют минимальным требованиям заказчика для исполнения i–го заказа, определяется формулой (1):

$$(1) \qquad J_i = \left\{ j = \overline{1, m} : g_i(d_{ij}, w_i, l_i, K_{ij}) \geq 0 \right\}, \; i = \overline{1, n}.$$

Если $|J_i| > 1$, то заказчик может выбрать наилучшие из приемлемых условий и множество наиболее предпочтительных исполнителей для него определяется формулой (2):

$$(2) \qquad \overline{J}_i = \arg\max_{j \in J_i} g_i(d_{ij}, w_i, l_i, K_{ij}), \; i = \overline{1, n}.$$

Пакет возможных предложений I_j для j–го исполнителя формируется, согласно формуле (3):

$$(3) \qquad I_j = \left\{ i = \overline{1, n}, : j \in J_i \right\}, \; j = \overline{1, m}.$$

С учетом желания заказчика выбрать наилучшего из приемлемых исполнителей, пакет предложений $\overline{I}_j$ для j–ого исполнителя может формироваться, согласно формуле (4):

$$(4) \qquad \overline{I}_j = \left\{ i : j \in \overline{J}_i \right\}, \; j = \overline{1, m}.$$

Исполнитель должен оценить предложенный пакет заказов по двум аспектам и получить ответы на следующие вопросы:

- возможно ли выполнение данного пакета заказов?
- выгоден ли данный пакет заказов?

Ответ на первый вопрос требует оценки производственных возможностей исполнителя. Если заказы исполняются независимо, то ответ можно получить, суммированием производственных возможностей (например, числа вагонов или автомобилей или сотрудников), необходимых для выполнения каждого заказа и сравнением результата с имеющимися возможностями компании. Выполнение пакета заказов по единому плану в ряде случаев позволяет использовать производственные возможности более эффективно. Перевозчики оптимизируют перемещения транспортных средств, а логистические компании могут повысить эффективность, например, группируя мелкие отправки. Обозначим *P* – предикат, определяющий наличие такого плана, и будем писать $P_j(I)=true$ или просто $P_j(I)$, если такой план у *j*–ой компании для пакета заказов *I* существует.

Ответ на второй вопрос требует вычисления доходов, расходов и прибыли при выполнении пакета заказов. Если заказы исполняются независимо, то можно оценить прибыль, получаемую *j*–м исполнителем от *i* – го заказа, по формуле (5):

$$(5) \qquad f_{ij} = d_{ij} - r_{ij}(w_i, l_i, K_{ij}),\ i = \overline{1,n},\ j = \overline{1,m},$$

где $r_i(w_i, l_i, K_{ij})$ - затраты *j*–го исполнителя на выполнение *i*–го заказа при заданном уровне качества.

Если выполнение пакета заказов производится по единому плану, то оценить затраты $r_i(w_i, l_i, K_{ij})$ на выполнение отдельных заказов, а значит и величину f_{ij}, может оказаться невозможным. В этом случае прибыль, получаемая *j*–м исполнителем от всего пакета, не может быть меньше, чем при исполнении заказов пакета независимо. Она вычисляется по формуле (6):

$$(6) \qquad f_j(I_j) = \sum_{i \in I_j} d_{ij} - r_j(I_j) - r0_j \geq \sum_{i \in I_j} f_{ij} - r0_j,\ j = \overline{1,m},$$

где $r_j(I_j)$ - затраты исполнителя на выполнение всего пакета заказов при согласованном с ценами d_{ij} уровне качества исполнения каждого заказа;

$r0_j$ - постоянные текущие затраты на обеспечение основной деятельности.

Приемлемым пакетом для *j*–ой компании может считаться пакет $\overline{\overline{I}}_j$, для которого прибыль неотрицательна, т.е. выполняется условие формулы (7):

$$(7) \qquad f_j(\overline{\overline{I}}_j) \geq 0,\ j = \overline{1,m}.$$

Задача формирования максимально прибыльного пакета заказов может решаться как задача оптимизации (8) с ограничениями (10):

$$(8) \qquad f_j(\overline{\overline{I}}_j) \xrightarrow[\overline{\overline{I}}_j \subseteq \overline{I}_j,\ P_j(\overline{\overline{I}}_j)]{} \max,\ j = \overline{1,m}.$$

Ответ на первый вопрос связан не только с прибылью, но и с доходами. Для поддержания нормального ритма работы компании, штата сотрудников, технического обеспечения необходим некоторый минимальный объем денежных средств. Обозначим его $D_j^{\min}$. Условие нормального ритма работы *j*–ой компании при выполнении пакета $\overline{\overline{I}}_j$ можно записать в виде следующего неравенства:

$$(9) \qquad \sum_{i \in \overline{\overline{I}}_j} d_{ij} \geq D_j^{\min},\ j = \overline{1,m}.$$

Нарушение этого условия потребует от компании применения специальных мер, например, сокращение штата сотрудников.

Объем расходов компании на выполнение пакета может превысить допустимое значение, которое даже при высоких доходах не может быть освоено сложившимся коллективом сотрудников и производственно-технической системой. Обозначим его $r_j^{\max}$ и запишем еще одно условие нормального функционирования компании:

$$(10) \qquad r_j(\overline{\overline{I}}_j) \leq r_j^{\max},\ j = \overline{1,m}.$$

Нарушение этого условия потребует от компании применения специальных мер, например, расширения штата сотрудников.

Для нахождения пакета $\overline{\overline{I}}_{\mathrm{j}}$, удовлетворяющего формулами (7)-(10) достаточно решить задачу (8) с ограничениями (10), которая является одним из вариантов NP-сложной «задачи о ранце» («нелинейная задача о ранце»). После ее решения неравенства (7) и (9) нужно проверить. Для случая независимого исполнения заказов подходит один из эвристических алгоритмов решения этой задачи, основанный на методе «затраты - эффект», который заключается в вычислении отношений ожидаемой прибыли к затратам и предпочтительном выборе тех заказов, для которых это значении больше. Задача (8), (10) может быть решена формированием пакета $\overline{\overline{I}}_{\mathrm{j}}$ в соответствии с методом «затраты - эффект» с дополнительной проверкой на каждом шаге кроме неравенства (10) условия $P_{\mathrm{j}}(\overline{\overline{I}}_{\mathrm{j}})$.

После того как исполнители сформировали свои пакеты заказов множество исполнителей $\overline{\overline{J}}_i$, которые готовы выполнить *i*–й заказ определяется формулой (11):

$$\overline{\overline{J}}_i = \left\{ j = \overline{1,m} : i \in \overline{\overline{I}}_j \right\},\ i = \overline{1,n}. \tag{11}$$

В ходе взаимодействия исполнителей с заказчиками среди заказов пакета $\overline{I}_{\mathrm{j}}$ появляется некоторое множество I_j^+ окончательно согласованных с заказчиком, т.е. обязательных для исполнителя заказов, по каждому из которых заключен договор. С учетом этого задача формирования максимально прибыльного пакета, записанная формулой (8) принимает вид формулы (12):

$$f_{\mathrm{j}}(\overline{\overline{I}}_j) \xrightarrow[I_j^0 \subseteq \overline{I}_{\mathrm{j}} \setminus I_j^+,\ P_{\mathrm{j}}(\overline{\overline{I}}_j)]{} \max,\ \mathrm{j} = \overline{1,m}, \tag{12}$$

где $\overline{\overline{I}}_{\mathrm{j}} = I_j^0 \cup I_j^+$, $\mathrm{j} = \overline{1,m}$, I_j^0 - переменная оптимизации. Формула (8) является частным случаем формулы (12) при $I_{\mathrm{j}}^+ = \varnothing,\ j = \overline{1,m}$.

Опишем алгоритм моделирования взаимодействия заказчиков с исполнителями, в ходе которых распределяются заказы между исполнителями, формируются пакеты заказов, а также определяются заказы, которые не могут быть выполнены.

1.2 Алгоритм моделирования формирования пакетов

Входными данными алгоритма являются: $\{(w_i, t_i, u_i, v_i), i = \overline{1,n}\}$ - общий список заказов транспортных услуг; $d_{ij},\ K_{ij},\ i = \overline{1,n},\ j = \overline{1,m}$ - предварительно согласованные требования заказчиков и исполнителей к цене и уровню качества исполнения услуги. Далее записаны шаги алгоритма.

1. $I^- = \varnothing$; $I_{\mathrm{j}}^+ = \varnothing,\ j = \overline{1,m}$; I^- - множество заказов, которые не могут быть выполнены, первоначально полагаем, что оно пусто; I_{j}^+ - множество заказов *j*–ого исполнителя, которые обязательны для него. Первоначально эти множества пусты.
2. Вычисление множеств $J_{\mathrm{i}},\ \mathrm{i} = \overline{1,n}$ по формуле (1).
3. Вычисление множеств $\overline{J}_{\mathrm{i}},\ \mathrm{i} = \overline{1,n},\ I_{\mathrm{j}},\ \overline{I}_{\mathrm{j}},\ \mathrm{j} = \overline{1,m}$ по формулам (2) - (4).
4. Далее, на каждом шаге циклического процесса исполнитель выбирает пакет заказов, заказчик – подтверждает или отвергает исполнителя. Вычисляются множества $\overline{\overline{I}}_{\mathrm{j}},\ \mathrm{j} = \overline{1,m},\ \overline{\overline{J}}_{\mathrm{i}},\ \mathrm{i} = \overline{1,n}$ с применением формул (7), (9)- (12).
5. Для всех *i*, для которых $\overline{\overline{J}}_{\mathrm{i}} \neq \varnothing$ заказчик должен подтвердить исполнителя или отвергнуть его. После этого корректируется соответствующим образом множество J_i. Из него удаляются все исполнители, кроме подтвержденного. Для всех *j* формируются множество заказов, в которых исполнитель подтвержден. Его элементы добавляются к множеству согласованных (обязательных для исполнителя) заказов $I_{\mathrm{j}}^+ \in \overline{\overline{I}}_{\mathrm{j}}$.
6. Для всех *i*, для которых $\overline{\overline{J}}_{\mathrm{i}} = \varnothing$ корректируется J_i. Из него удаляются те элементы множества исполнителей $\overline{J}_{\mathrm{i}}$, для которых все заказы окончательно согласованы.
7. Если $\exists i : J_{\mathrm{i}} = \varnothing$, то *i*-й заказ не может быть выполнен. Присоединяем все такие заказы к множеству I^-.

8. Если $\bigcup_{j=1}^{n} I_j^+ \cup I^- = \{1,\ldots,n\}$, то это означает, что все заказы распределены между исполнителями либо не могут быть выполнены. В этом случае работа алгоритма заканчивается, в противном случае перейти к п.3.

2 Планирование исполнения пакета услуг

Задачу построения единого плана выполнения пакета заказов рассмотрим на примере планирования оптимального перемещения порожних железнодорожных вагонов (автомобилей или других транспортных средств) по транспортной сети.

Обозначим *U* – множество вершин графа транспортной сети. Будем рассматривать задачу перемещений на дискретном временном отрезке длины *T*, состоящем из дискретных моментов времени, обозначаемых целыми числами *{1,..,T}*. Пусть дан пакет заказов $\bar{I}_j$ *j*-ой компании на перевозку грузов. Потребности в порожних вагонах или их избыток можно выразить с помощью матрицы балансов для данного пакета. Элементами этой матрицы являются значения β_u^t для каждого момента времени *t* и каждого узла сети *u*, вычисляемые по формуле (13), как разности количества всех прибывших в пункт *u* и всех отправленных из пункта *u* загруженных вагонов до момента *t*, т.е.:

$$\beta_u^t = \sum_{k \in \bar{I}_j, v_k = u, t_k + t(u,v) \le t} w_k - \sum_{k \in \bar{I}_j, u_k = u, t_k \le t} w_k, \quad u \in U, t = \overline{1,T}, \tag{13}$$

где *t(u,v)*- время перемещения между вершинами сети *u* и *v*.

Значения $\beta_u^t<0$ означает, что данный узел *u* в данный момент времени *t* испытывает потребность в данном количестве вагонов. Значения $\beta_u^t>0$ означает, что в данном узле *u* в данный момент времени такое количество вагонов имеется в избытке.

Обозначим: x_{uv}^t – количество порожних вагонов, отправляемых в момент времени *t* из пункта *u* в пункт *v*. Необходимым условием возможности перемещений порожних транспортных средств является наличие достаточного их количества в сети. Обозначим $z_u, u \in U$ - распределение порожних вагонов по узлам сети в начальный момент времени.

Минимально необходимое количество вагонов и их распределение по сети можно определить, решив задачу оптимизации (15) при ограничениях (14):

$$\sum_{v \in U, v \ne u} \Big(\sum_{\tau \le t} x_{uv}^\tau - \sum_{\tau \le t - t(u,v)} x_{vu}^\tau\Big) - z_u \le \beta_u^t, \; u \in U, t = \overline{1,T}. \tag{14}$$

$$\sum_{u \in U} z_u \xrightarrow[z_u, x_{uv}^t : u,v \in U, t = \overline{1,T}]{} \min. \tag{15}$$

При решении задачи (15), (14) кроме искомого начального распределения вагонов получаем также план перемещений порожних вагонов, обеспечивающих выполнение пакета заказов при данном начальном распределении вагонов. Это решение является допустимым, т.е. обеспечивает выполнение пакета заказов, но не является оптимальным.

Для обеспечения возможности вагонного парка *j*-ой компании выполнения данного пакета заказов $\bar{I}_j$ должны выполняться ограничения (14), которые при известных значениях $z_u, u \in U$ будут выглядеть, согласно формуле (16), следующим образом:

$$\sum_{v \in U, v \ne u} \Big(\sum_{\tau \le t} x_{uv}^\tau - \sum_{\tau \le t - t(u,v)} x_{vu}^\tau\Big) \le z_u + \beta_u^t, \; u \in U, t = \overline{1,T}. \tag{16}$$

Элементы матрицы балансов в этом случае равны: $z_u + \beta_u^t, \; u \in U, t = \overline{1,T}$. Минимально необходимое количество перемещения порожних вагонов можно определить, решив задачу оптимизации (17) при ограничениях (16):

$$\sum_{u,v \in U} \Big(\sum_{t=1}^{T} x_{uv}^t\Big) * t(u,v) \xrightarrow[x_{uv}^t : u,v \in U, t = \overline{1,T}]{} \min. \tag{17}$$

Для использования симплекс-метода для решения поставленных задач необходимо записать данную задачу в матричном виде. Задача (15), (14) задается формулами (18), (19). Задача (17), (16) - формулами (20), (21).

$$Ax - Bz \le \beta ; \quad (18)$$

$$Cz \xrightarrow[z,x]{} \min ; \quad (19)$$

$$Ax \le \alpha ; \quad (20)$$

$$Dx \xrightarrow[x]{} \min , \quad (21)$$

где $\alpha = Bz + \beta$, *C*- единичный вектор размера *N*, *x*, *z*, β и *D*– векторы, построенные в соответствии с формулами (22)-(25). Перенумеруем множество *U* и обозначим *N*=|*U*|.

$$x = \left[x_{11}^1,\ldots,x_{1N}^1,\ldots,x_{N1}^1,\ldots,x_{NN}^1,\ldots,x_{11}^T,\ldots,x_{1N}^T,\ldots,x_{N1}^T,\ldots,x_{NN}^T\right]^T ; \quad (22)$$

$$z = \left[z_1,\ldots,z_N\right]^T ; \quad (23)$$

$$\beta = \left[\beta_1^1,\ldots,\beta_N^1,\ldots,\beta_1^T,\ldots,\beta_N^T\right]^T ; \quad (24)$$

$$D = \left[t_{11},\ldots,t_{1N},\ldots,t_{N1},\ldots,t_{NN},\ldots,t_{11},\ldots,t_{1N},\ldots,t_{N1},\ldots,t_{NN}\right]^T , \quad (25)$$

где t_{uv}=t(u,v).

Переменные вида: x_{uu}^t - фиктивно присутствуют в записи вектора. Реально, все коэффициенты при этих переменных равны 0 (например, $t(u,u) = 0$ для всех u).

A – матрица, сформированная из трехуровневой структуры, имеет размер N*T×N²*T и строится из клеток $\bar{0}$ и E следующим образом (26):

$$A = \begin{pmatrix} E & \bar{0} & \ldots & \bar{0} \\ E - E(1) & E & \ldots & \bar{0} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ E - E(T-1) & E - E(T-2) & \ldots & E \end{pmatrix}, \quad \bar{0} = \begin{pmatrix} \bar{\bar{0}} & \bar{\bar{0}} & \ldots & \bar{\bar{0}} \\ \bar{\bar{0}} & \bar{\bar{0}} & \ldots & \bar{\bar{0}} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \bar{\bar{0}} & \bar{\bar{0}} & \ldots & \bar{\bar{0}} \end{pmatrix}, \quad (26)$$

$$E = \begin{pmatrix} e_1 & \bar{\bar{0}} & \ldots & \bar{\bar{0}} \\ \bar{\bar{0}} & e_2 & \ldots & \bar{\bar{0}} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \bar{\bar{0}} & \bar{\bar{0}} & \ldots & e_n \end{pmatrix},$$

где на первом уровне *A* - квадратная клеточная матрица размера *T*, на втором уровне $\bar{0}$, *E* и *E(l)* - квадратные клеточные матрицы размера *N*. Элементы (клетки) матрицы *E* имеют размер 1**N*. Это нулевые строки $\bar{\bar{0}}$ и строки $e_u = \left(\overleftrightarrow{1,1,\ldots,1}^{u-1},0,1,\ldots,1\right)$, соответственно $\bar{0}$ - нулевая матрица размера *N***N*².

Элементами (клетками) матрицы $E(l) = \{e_{uv}(l)\}$ являются строки размера *N*, а именно: нулевые строки $\bar{\bar{0}}$ и строки $\overline{e_u} = \left(\overleftrightarrow{0,0,\ldots,0}^{u-1},1,0,\ldots,0\right)$. Элементы (клетки) матрицы $e_{uv}(l)$ выбираются следующим образом (27):

$$e_{uv}(l) = \begin{cases} \bar{\bar{0}} - \textit{если } u = v \textit{ или } t(u,v) > l \\ \overline{e_u} - \textit{в остальных случаях} \end{cases}. \quad (27)$$

B – матрица, сформированная из двухуровневой структуры, имеет размер *N*T×N* и строится как клеточный столбец размера *T* из единичных матриц размера *N*.

В приведенных постановках задач обычный симплекс-метод дает целочисленные решения при целочисленных правых частях ограничений.

Затраты на выполнение транспортной услуги включают в себя затраты: на прогон порожних транспортных средств, на провоз груза, на погрузо-разгрузочные работы, на обеспечение дополнительного качества услуг. Затраты на прогон порожних транспортных средств зависят от начального их расположения на сети, они индивидуальны для каждой компании и зависят от плана перемещения. Решение задачи оптимизации позволяет вычислить количество вагонов, перемещающееся в порожнем состоянии, оборот порожних вагонов. Затраты на порожние прогоны при выполнении данного пакета заказов $\overline{I}_j$ вычисляются с помощью формулы (28):

$$\sum_{i \in I_j} re_{ij}(\overline{K}_{ij}) = p^{\Pi} * \sum_{u,v \in U} \left(\sum_{t=1}^{T} \overline{x}_{uv}^{t}\right) l(u,v)), \; j = \overline{1,m}, \qquad (28)$$

где p^{Π} - цена за перемещение по сети порожних вагонов;

$\overline{x}_{uv}^{t}$ - вычисленные при решении задачи оптимизации для пакета $\overline{I}_j$ значения количества перемещенных порожних вагонов между пунктами u и v в момент времени t;

$l(u,v)$ – расстояние между пунктами u и v;

$\overline{K}_{ij}$ - уровень качества, соответствующий оптимальной схеме перегона порожних вагонов.

Остальные виды расходов жестко зависят от параметров заказов (объемов груза, дальности) и не могут меняться средствами оперативного управления компаний. Постоянные затраты на поддержание парка транспортных средств вычисляются по формуле: $r0_j = s_j * p^0$, где p^0 – затраты на содержание одного транспортного средства в заданный период, s_j –количество транспортных средств в j-й компании.

3 Пример расчета

Рассмотрим простую транспортную сеть в виде следующего неориентированного графа (рис. 1). Расстояния между смежными вершинами равны 1.

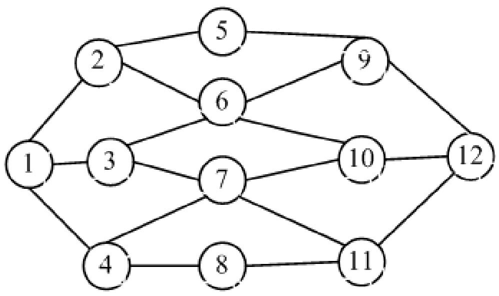


Рис. 1. Транспортная сеть

Пусть имеется единственная грузовая компания и следующий пакет заказов $\overline{I}_j$ на перевозки (табл. 1). Считаем, что стоимость заказа пропорциональна его объему.

Объем заказа измеряется в количестве необходимых вагонов, пункты отправления и назначения представляют собой номера вершин на графе транспортной сети. Даты - позиции на условной оси времени. Считаем, что процесс разворачивается в течение более 7-ми временных единиц (дней, недель и др.). Необходимо вычислить минимально необходимое количество вагонов и необходимый оборот порожних вагонов и оценить затраты на порожний прогон. Сначала вычислим минимально необходимое количество вагонов для выполнения этого пакета. Для этого решим задачу (15), (14).

Таблица 1 Пакет заказов на перевозку

Номер	Пункт отправления	Пункт назначения	Дата отправления	Дата прибытия	Объем
1	1	4	2	3	3
2	2	5	2	3	4

Номер	Пункт отправления	Пункт назначения	Дата отправления	Дата прибытия	Объем
3	3	10	3	5	5
4	4	11	4	6	6
5	5	9	2	3	7
6	6	7	2	4	6
7	7	6	3	5	5
8	9	5	4	5	4
9	8	4	4	5	3
10	10	3	2	4	2
11	11	2	3	7	3
12	12	10	6	7	3
13	8	1	7	9	8
14	11	7	6	7	4
15	7	9	4	7	4
16	12	11	3	4	1
17	4	2	5	7	5
18	6	12	5	7	7
19	8	11	2	3	7
20	6	3	6	7	5
21	2	12	7	10	8
22	12	1	7	11	7
23	9	3	7	9	5

Результаты ее решения (начальное распределение вагонов), а также матрица балансов (правых частей неравенства (16), т. е. значений выражений $z_u + \beta_u^t,\ u \in U, t = \overline{1,T}$) для данного пакета заказов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Балансы вагонов в пунктах сети в различные моменты времени.

Пункты	Начальное распределение вагонов	Моменты времени						
		1	2	3	4	5	6	7
1	3	3	0	0	0	0	0	0
2	4	4	0	0	0	0	0	0
3	5	5	5	0	2	2	2	7
4	3	3	3	6	0	-2	-2	-2
5	7	7	0	4	4	8	8	8
6	6	6	0	0	0	-2	-7	-7
7	5	5	5	0	2	2	2	6
8	7	7	0	0	-3	-3	-3	-11
9	0	0	0	7	3	3	3	2
10	2	2	0	0	0	5	5	8
11				4	5	5	7	7
12	1	1	1	0	0	0	-3	-3
Всего	43	43	14	21	13	18	12	15

Для нахождения оптимального плана перемещений порожних вагонов необходимо решить задачу (17), (16). Если вагонов достаточно для выполнения всех заказов алгоритм симплекс-метода минимизирует функцию суммарного расстояния порожнего пробега. Результаты ее решения в виде схемы перемещений изображены на рис. 2. Здесь вершины соответствуют вершинам графа транспортной сети. Цифры, приписанные к дугам, означают, соответственно: «количество вагонов – расстояние - момент начала перемещения».

Затраты на порожние прогоны можно вычислить по формуле (28) и они будут равны $36 p^{\Pi}$. Затраты на содержание вагонного парка составят $43p^0$. Доход от выполнения данного пакета будет равен $215p^{д}$, где $p^{д}$ – договорная цена с грузоотправителем за единицу грузооборота.

Теперь представим, что вагоны поделены между двумя компаниями. Компания *A* владеет вагонами в пунктах 1-5, компания *B* – соответственно – в пп. 6-12. Оценим возможности компаний по выполнению заказов пакета. Клиентская база компаний должна определяться рыночной конъюнктурой, но в первый момент после разделения компаний ее еще трудно оценить и разделение клиентской базы может проходить спонтанно. Решая поставленные выше задачи оптимизации, определим оборот порожних вагонов, расходы и доходы каждой компании.

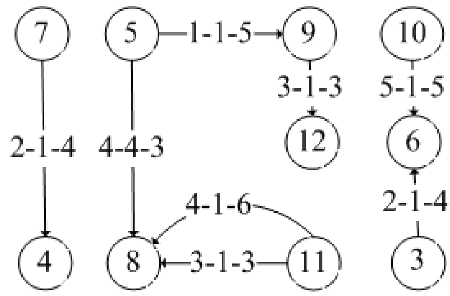


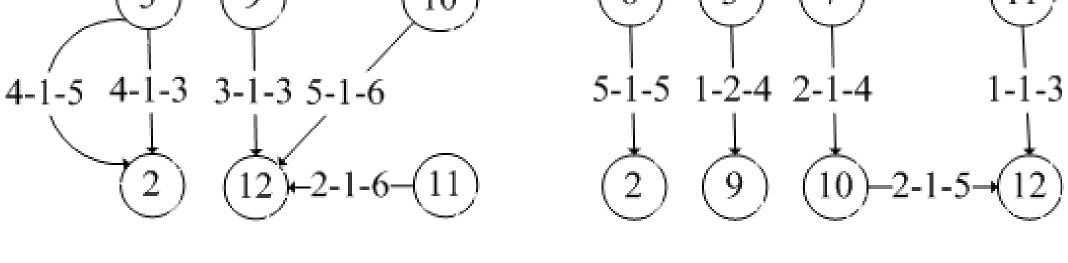
Рис. 2. План перемещений порожних вагонов одной компании

Будем считать, что $J_i = \overline{J}_i = \{A, B\}, i = \overline{1,23}$ и соответственно $I_A = I_B = \overline{I}_A = \overline{I}_B = \{i : i = \overline{1,23}\}$. Вычислим теперь $\overline{\overline{J}}_i, i = \overline{1,23}, \overline{\overline{I}}_A, \overline{\overline{I}}_B$. В ситуации, когда вагонов недостаточно для выполнения всех заказов, симплекс-метод не может построить допустимое решение. В качестве результата алгоритм выдает значения некоторых основных переменных, по которым однозначно определяются: момент времени, пункт отправления и пункт назначения порожнего перегона, количество вагонов. Кроме того, определяется момент времени и пункт, где оказалось невозможным обеспечить требуемое количество вагонов. На основании анализа этих результатов можно принять решение либо о введении дополнительных вагонов, либо об отказе от выполнения некоторых заказов. В данном случае решение задачи (12) с ограничениями (7), (9), (10) сводится к решению нескольких вариантов задач (17), (16). В результате этого были найдены два подмножества пакета заказов, не допускающие расширение и подходящие для компаний *A* и *B*. Представим эти множества в виде таблицы 3. Строки таблицы представляют собой пакеты заказов $\overline{\overline{I}}_A, \overline{\overline{I}}_B$ компаний *A* и *B*, а столбцы - $\overline{\overline{J}}_i, i = \overline{1,23}$. Символом «+» помечены заказы, включенные в пакеты.

Таблица 3. Распределение заказов между компаниями.

Компании	Номера заказов													
	1-5	6-7	8	9	10-11	12	13	14	15-16	17-18	19	20	21	22	23
A	+		+			+		+					+	+	
B		+			+	+		+	+		+		+		+

Из таблицы видно, что $\overline{\overline{J}}_i = \varnothing, i = 9, 13, 17, 18, 20$ (эти заказы не попали ни к одной компании), а $\overline{\overline{J}}_{12} = \overline{\overline{J}}_{14} = \overline{\overline{J}}_{21} = \{A, B\}$, т. е. эти заказы могут быть предметом торгов между компаниями. Оценим оптимальные перемещения порожних вагонов компаний и затраты на перемещения. Схемы перемещений изображены на рис. 3. Доходы и расходы компаний сведены в таблицу 4.



a) Компания A *b) Компания B*

Рис. 3. План перемещений порожних вагонов для двух компаний

Таблица 4. Расходы и доходы компаний.

Компании	Доходы (рД)	Расходы на порожний прогон (рП)	Расходы на содержание парка (р0)
Компания А	99	18	22
Компания В	99	12	21
Компания А (1)	68	18	22

Из таблицы видно, что компания *B* находится в более предпочтительных условиях и имеет резервы в торгах с компанией *A*, поэтому будем считать, что спорные заказы получит компания *B* (возможно, понеся некоторые дополнительные затраты на повышение качества или снижение цены). Множества $I_A^+ = \{1-5,8,22\}, I_B^+ = \{6,7,10\text{-}12,14\text{-}16,19,21,23\}$. Скорректируем множества J_i, следующим образом: $J_i = \{A\}$ для $i = 1-5,8,9,13,17,18,20,22$ и. $J_i = \{B\}$ для $i = 6,7,10\text{-}12,14\text{-}16,19,21,23$. Компания *A*, лишается некоторых заказов и может попытаться получить один или несколько невостребованных заказов. В результате решения нескольких вариантов задач (17), (16), на следующем шаге алгоритма получаем новое значение множества $\bar{\bar{I}}_A = \{1-5,8,18,20,22\}$. Все заказы пакета подтверждаются заказчиками, т.е. компания *A* получает дополнительно заказы 18 и 20 и $I_A^+ = \{1-5,8,18,20,22\}$. Множество $I^- = \{9,13,17\}$. Объединение множеств $I_A^+ \cup I_A^+ \cup I^- = \{1,\ldots,23\}$ и работа алгоритма закончена. Доходы и расходы компании *A* в окончательном варианте показаны в третьей строке таблицы 4.

4 Особенности моделирования

При моделировании на каждом шаге множество заказов, пункты отправления и назначения, сроки начала погрузки, количество груза, начальные предложения цены за перевозку единицы груза на единицу расстояния могут, в зависимости от цели моделирования, задаваться программно или генерироваться случайным образом. Аналогично задается количество операторских компаний, для каждой компании - общее количества вагонов и их распределение по узлам сети, первоначальные величины требований компании к цене за перевозку и качество.

Качество перевозки, как функцию затрат на единицу грузооборота, можно, в частности, аппроксимировать с помощью степенной производственной функции. В результате функция g предпочтений грузоотправителя примет вид (29):

$$(29) \qquad g(d,w,l,K) = K - b*(d/w*l)^{\alpha}, \qquad b>0,\ 0<\alpha<1.$$

Клиентоориентированная политика транспортно-логистических компаний предполагает создание и использование информационных баз, содержащих, в частности, статистику предпочтений клиентов. На ее основе можно подобрать коэффициенты формулы (29) для моделирования поведения реального заказчика.

Каждая компания выбирает пакеты заказов в соответствии с критерием поведения, например, стараясь максимизировать прибыль от перевозок. В этом случае ей необходимо решать задачу (12). Другие компании могут обходиться ограничениями (7), (9), (10). Одни компании стараясь обойтись минимумом вагонов должны решать задачи (15), (14) и (17), (16). Другие, наоборот, придерживаются правила «для каждого заказа – свой вагон», что избавляет от этой необходимости, но дает меньшую прибыль и минимизирует риск невыполнения заказа. Эти свойства также могут быть заданы программно или сгенерированы случайным образом.

Заказчики перевозок предъявляет свои частные требования к качеству услуги - выполнение сроков доставки, минимальные потери, дополнительное обслуживание. Интегральный показатель качества выражает сумму затрат, которые компания готова понести для выполнения этих частных требований на нужном уровне. Он необходим для сопоставления его с ценой и другими параметрами заказа в соответствии с формулой (29).

Исходя из количества вагонов, количества перемещений вагонов и полученного дохода, можно оценить эффективность компаний. Дальнейшее развитие модели предполагает добавление к ней механизмов перетекания заказов от менее эффективных к более эффективным компаниям, перетекания вагонов из компаний с малым числом заказов к компаниям с большим числом заказов. Многократное решение данной задачи позволяет исследовать динамику этих процессов при различных начальных условиях.

Заключение

Рассмотрена схема взаимодействия субъектов транспортного процесса, таких как, грузоотправитель, логистическая компания, перевозчик в ходе формирования пакетов транспортных услуг. Поставлена и решена задача составления единого плана исполнения пакета услуг. В приведенных постановках задач обычный симплекс-метод дает целочисленные решения.

В расчетах показан статический вариант модели, в котором список заказов фиксирован и заранее известен. В динамическом варианте планировать оптимальное поведение на перспективу необходимо в условиях неопределенности. Оптимальный план в этом случае должен пересчитываться при каждом изменении ситуации (возникновение новых заказов, изменение требований заказчика к цене и качеству).

Литература

1. *Malygin I., Komashinsky V., and Tsyganov V.* “International Experience and Multimodal Intelligent Transportation System of Russia.” Proceedings of the 2017 Tenth Conference "Management of Large-Scale System Development". Moscow: IEEE, 2017. pp. 1-5. http://ieeexplore.ieee.org/document/8109658/ **DOI:** 10.1109/MLSD.2017.8109658.
2. *Kwami Sossoe.* “Modeling of multimodal transportation systems of large networks.” Automatic Control Engineering. Université Paris-Est, 2017. English. <NNT : 2017PESC1196>. <tel-01748442>. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01748442/document.
3. *Moccia, Luigi & Cordeau, Jean-François & Laporte, Gilbert & Ropke, Stefan & Maria Pia, Valentini.* “Modeling and Solving a Multimodal Transportation Problem with Flexible-time and Scheduled Services.” Networks. 2011, Volume 57, Issue 1 pp. 53-68. 10.1002/net.20383.
4. *Berg, Sjaak van den.* “Demand-to-Train Allocation in a Hub-and-Spoke Network.” (2014).
5. *Joborn, Martin & Crainic, Teodor Gabriel & Gendreau, Michel & Holmberg, Kaj & Lundgren, Jan.* “Economies of Scale in Empty Freight Car Distribution in Scheduled Railways,” Transportation Science 38(2), pp. 121–134.
6. *Hungerländer, Philipp and Sebastian Steininger. “*Fleet Sizing and Empty Freight Car Allocation.” (2018).
7. *Mnif M. and Bouamama S. A* “Multi-objective Mathematical Model for Problems Optimization in Multi-modal Transportation Network.” DOI: 10.5220/0006472603520358 In Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2017) - Volume 1, pages 352-358 ISBN: 978-989-758-263-9.
8. *V. V. Tsyganov and S. A. Savushkin.* “Intellectual Catalog of Digital Rail Transport Services,” 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, Russia, 2018, pp. 1-8. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570150.
9. *Tsyganov V. and Savushkin S.* “Optimization of the Service Catalog of a Large-Scale Corporation,” Proceedings of 2017 Tenth Conference "Management of Large-Scale System Development". Moscow: IEEE, 2017. pp. 1-5. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109699.
10. *Savushkin S. A.* “Equalization of Management Complexities of Transport Networks,” 2018 Eleventh International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD, Moscow, Russia, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/MLSD.2018.8551787.
11. *Цыганов В.В., Малыгин И.Г., Еналеев А.К., Савушкин С.А.* Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза - СПб: ИПТ РАН, 2016.-216с (ISBN 978-5-9908209-3-7).