

В. В. СКАЛОЗУБ (ДИИТ), О. В. СОЛТЫСЮК (ТМСофт, г. Киев),
В. В. СКАЛОЗУБ (НГУ)

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБОБЩЕННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ С УЧЕТОМ ИНТЕРЕСОВ МНОЖЕСТВА СОБСТВЕННИКОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОННЫХ ПАРКОВ

Запропоновано і досліджено нові багатокритеріальні моделі транспортної задачі, призначені для розрахунку оптимальних планів залізничних перевезень, коли ураховуються інтереси кількох власників вантажних вагонів. Зведено приклади розрахунків компромісно-оптимальних планів перевезень.

Предложены и исследованы новые многокритериальные модели транспортной задачи, предназначенные для расчетов оптимальных планов железнодорожных перевозок, когда учитываются интересы нескольких владельцев грузовых вагонов. Приведены примеры расчетов компромисно-оптимальных планов перевозок.

New, multi-criteria models of transport task, intended for calculation of optimum railway operational schedules, with account of interests of several freight car owners, have been proposed and examined in the paper. The examples of calculations of compromise-and-optimum operational schedules have been provided.

Введение

Экономико-математическое моделирование оптимального планирования перевозки грузов при учете неоднородности средств перевозки по правам собственности.

В традиционных исследованиях по оптимальному планированию перевозок грузов (модели транспортной задачи (ТЗ) [1] и ее модификаций) предполагается следующие:

- все средства перевозки (СП) однородны по правам собственности;
- средства перевозки одинаковы по возможности их включения в план;
- однородность СП по направлению движения (пункт назначения может быть любым и выбирается на основе решения задачи минимизации);
- не учитывается прибыль от выполнения перевозки отдельным транспортным средством или же их группой (эксплуатационные затраты, возможный износ СП);
- не учитывается время, затраченное на перевозку, на оборот каждого СП.

Таким образом, свойства средств перевозки не включаются в распределительную модель и не являются характеристиками задачи. Эти показатели не существенны, если средства перевозки принадлежат одному собственнику, как это неявно предполагается в базовой ТЗ. Вместе с тем в настоящее время возник круг собственников железнодорожных средств перевозки, грузовых вагонов (операторские, экспедиторские компании, др.). Неоднородность средств

перевозки, в рассматриваемом нами случае по правам собственности, качественно изменяет содержание задачи оптимального планирования процессов перевозки грузов на железнодорожном транспорте.

В современных условиях хозяйствования выделяется новая экономико-математическая задача – разработка математических моделей транспортной задачи с несколькими собственниками средств перевозки и расчет компромиссно-оптимальных планов выполнения перевозок с учетом факторов, связанных с правами собственности (прибыль, эксплуатационные затраты, пробег вагонов, приоритетные направления следования в соответствии с логистическими задачами и др.). Актуальность проблемы учета прав собственности в области железнодорожного транспорта обусловлена существованием единой технологии переработки вагонопотоков на основе общих организационно-технических средств, использованием общего для всех участников информационного обеспечения и других систем. Выполнить независимое для каждого участника планирование и реализовать перевозку грузов без учета других «перевозчиков» не представляется возможным.

В работе исследованы модели расширенной неоднородной транспортной задачи, в которых учтены интересы множества собственников средств перевозки (НТЗСП). Рассмотрены методики включения основных свойств и интересов участников процесса перевозок в модель задачи оптимального планирования: побочные платежи, кооперативные игры, векторная опти-

мизация. Выполнены расчеты компромиссно-оптимальных планов транспортной задачи с неоднородными по правам собственности средствами перевозки.

1. Характеристики транспортной задачи с учетом неоднородности средств перевозки по правам собственности

В отличие от классических постановок ТЗ [1], в которых все свойства оптимального плана определяются издержками, представленными матрицей «расстояний» (удельных затрат)

$$C = \|C_{ij}\|_{m,n}, \quad (1)$$

где m – количество пунктов отправки грузов ($A_i, i = 1, \dots, m$), n – количество пунктов доставки грузов ($B_j, j = 1, \dots, n$), C_{ij} – удельные затраты на перевозку из пункта A_i в пункт B_j , средства перевозки однородны: в равной степени могут использоваться для любых перевозок, исходя из одной и той же матрицы (1), в моделях НТЗСП для каждого СП, расположенного в пункте A_i , его направление в некоторый пункт B_j оценивается неодинаково.

Таким образом, традиционная модель транспортной задачи не рассматривает средства перевозки как самостоятельные компоненты, имеющие индивидуальные характеристики (вектор показателей), которые учитываются при планировании. НТЗСП содержат средства для представления требований участников перевозок OK_k (операторских и экспедиторских компаний). Это расширение модели задачи может быть выражено, например, тем, что матрицы вида (1) – $C^{(k)}, k = 1, 2, \dots, K$, задаются отдельно для каждого СП (учитывает логистические, технологические, перспективные и другие задачи). В зависимости от состава и способа включения в модель НТЗСП характеристик участников OK_k получают различные модели расширенной распределительной задачи по планированию грузовых железнодорожных перевозок.

В представленной работе рассматривается случай НТЗСП для перевозки однородного груза, когда у перевозчиков имеются приоритетные пункты назначения, ими по-разному оцениваются удельные затраты, матрицы $C^{(k)}$. Особенность расширенной задачи в том, что учет прав собственности на СП (вагоны) предполагает формализацию и отражение в оптимальном решении ряда дополнительных пока-

зателей, условий, соглашений. Моделям и методам НТЗСП для перевозки разнородных грузов будет посвящена отдельная работа.

Основные дополнительные компоненты расширенной задачи НТЗСП. Представление компромиссного характера задачи планирования, а также принятых соглашений о дележах общей прибыли (эксплуатационных и других видов затрат). Для реализации этих требований вводится модель, регулирующая распределение доходов-затрат. При этом возможны несколько подходов.

Дележ на основе побочных платежей [2] с учетом приоритета OK_k . В этом случае матрица (1) может быть единой.

Формирование компромиссного выбора на основе принципа эффективности Парето [3].

Учет изменения формы целевой функции из-за рассмотрения множества матриц удельных затрат $C^{(k)}$.

Применение методов дележа согласно теории кооперативных игр [2] дает следующее.

Изменение и дополнительное обоснование компонентов транспортной задачи для отражения условий, связанных с открытыми и закрытыми моделями.

Если суммарное количество СП в пунктах отправления A_i больше, чем потребность пунктов назначения B_j , необходимо установить какими из имеющихся СП следует выполнять перевозку. Здесь дополнительно должна быть определена процедура замыкания задачи – перевода части вагонов в резерв. При этом следует учитывать механизмы компенсации двух видов:

- учет недополучения прибыли $\Pi^{(k)}$, (и перспективы выполнения перевозок в будущем за счет изменения дислокации СП) сторонами, вагоны которых оставлены в резерве;

- учет фактических эксплуатационных затрат E_k , и амортизационного износа Z_k для СП, включенных в план перевозки. Различные методики по реализации механизмов компенсации приводят к многообразию видов НТЗСП.

Если суммарное количество СП в пунктах отправления A_i меньше чем потребность пунктов назначения B_j , необходимо установить какие заявки по назначению следует удовлетворить в первую очередь, чтобы минимизировать транспортные расходы, учитывая совокупность матриц $C^{(k)}$, максимизировать прибыль участников процесса перевозки OK_k .

Вторая составляющая процедуры перехода к закрытой модели НТЗСП предполагает анализ компромисса показателей – затрат и прибыли, полученной за тариф от перевозки грузов.

В случае закрытой модели классической транспортной задачи в НТЗСП все же необходимо предусмотреть структуры по учету предпочтительных направлений перевозки для отдельных собственников $OK_k, C^{(k)}$.

При формировании расширенных моделей транспортной задачи будем стремиться к тому, чтобы в наибольшей степени сохранить арсенал известных методов оптимального планирования перевозки (методы потенциалов и др. [1]). В связи с этим следует в первую очередь выделить подход на основе теории игр с побочными платежами [2]. Согласно нему модель дележа (затрат, доходов) выводится за рамки собственно задачи планирования, в которой разыскивается экстремальное значение (или же компромиссно-оптимальный набор значений) обобщенного аналога целевой функции модели ТЗ.

При более полном отображении свойств задачи НТЗСП подходы теории игр с побочными платежами все же являются недостаточными, поскольку в модели должен быть представлен также и механизм разрешения компромиссной задачи для совокупности показателей Π_k, E_k, Z_k .

Для обеспечения возможности применения арсенала методов ТЗ можно в первом приближении построить модели НТЗСП, включив все особенности и неопределенности, связанные с компромиссным характером задачи, в редуцированную матрицу «расстояний». Разумеется, что возникающие при этом разные структуры этих матриц приводят к различным постановкам транспортной задачи с множеством собственников средств перевозки.

2. Представление свойств собственников средств перевозки в моделях НТЗСП

Свойства собственников СП (количество вагонов, предпочтения в направлениях перевозки, обязательства по согласованным действиям и др.) являются основой для формирования компромиссно-оптимальных решений задач по планированию перевозок. В зависимости от возможности получения и формы представления этой информации получают различные модели расширенной транспортной задачи: детерминированные, стохастические, нечеткие. Далее обсуждаются возможности по формализации основных для нас свойств собственников.

Представление предпочтений о направлениях следования СП B_j для каждого из пунктов отправления A_i .

Приоритет пунктов B_j может быть задан с помощью следующих структур:

- вектор

$$\bar{V}_{(k)} = (v_{1(k)}, v_{2(k)}, \dots, v_{n(k)}),$$

если пункты отправления A_i не существенны при направлении грузов в пункты B_j ;

- матрица

$$W_{(k)} = \|w_{ij}(k)\|,$$

если существенны как пункты назначения B_j , так и пункты отправления A_i .

В случае задания вектора $\bar{V}_{(k)}$ его компоненты представляют ряд приоритета ($v_{i(k)} = I_{i(k)}$) и весовой вектор ($v_{i(k)} = \alpha_{i(k)}$) приоритета пунктов назначения B_j .

Ряд указывает упорядочение пунктов B_j без оценки степени предпочтения

$$\bar{I}_{(k)} = (I_{1(k)} \prec I_{2(k)} \prec \dots \prec I_{n(k)}), \quad (2)$$

где $I_{p(k)}$ – числовая характеристика (возможно, порядковый номер) приоритета пункта назначения B_p . Вектор приоритета $\bar{\alpha}_{(k)}$ определяется соотношениями:

$$\bar{\alpha}_{(k)} = (\alpha_{1(k)}, \alpha_{2(k)}, \dots, \alpha_{n(k)}); \quad \alpha_{p(k)} \geq 0,$$

$$\sum_p \alpha_{p(k)} = 1. \quad (3)$$

В матрице приоритетов $W_{(k)} = \|w_{ij}(k)\|$ строки формируются на основе представлений вида (2) или (3).

Информация о значимости собственников средств перевозки – OK_k . Эти данные являются наиболее важными при формировании заключительных решений при многих участниках задачи НТЗСП. Простейшей моделью «силы» OK_k является вектор нормированных значений количества средств N_k , имеющихся у каждого k -го собственника:

$$\bar{\beta} = (\beta_{(1)}, \beta_{(2)}, \dots, \beta_{(K)}), \quad (4)$$

где

$$\beta_{(k)} = N_k \setminus \sum_j N_j.$$

В ряде случаев одной количественной характеристики недостаточно, чтобы отобразить значимость конкретного собственника OK_k в конкретной ситуации планирования перевозки. Более точной мерой могут быть операционные свойства – степень участия OK_k в получении коллективной прибыли (затратах). Для получения моделей НТЗСП, учитывающих операционные свойства участников перевозки, могут быть использованы несколько подходов: теория неантагонистических кооперативных игр, методы векторной оптимизации и др. Отметим, что модели и методы кооперативных игр (арбитражные схемы, вектор Шепли, n – ядро, индексы Банзафа [1; 2]) могут быть использованы не только для оценки значимости каждого из участников НТЗСП, а и самостоятельно для получения окончательного решения. Вместе с тем, в этих случаях следует разработать соответствующие новые или усовершенствовать известные классические методы решения транспортной задачи. При введении оценок «силы» участников OK_k можно ограничиться редукцией модели, сохраняя методы расчетов оптимальных планов.

Остановимся на оценках «силы» OK_k на основе решения серии задач оптимизации, в которых перевозка реализуется $(K-1)$ участником, $k, k \in [1, 2, \dots, K]$. Пусть $F_k[X_{(q)}^*]$ – показатель эффективности оптимального решения НТЗСП для собственника вагонов k , если из участия в перевозке исключен собственник OK_q . Участнику OK_q сопоставлено значение средней эффективности плана вида

$$d_q = [1 \setminus (K-1)] \sum_{k \neq q} F_k[X_{(q)}^*]. \quad (5)$$

Наивысшую «силу» имеет OK_q , для которого получена наименьшая оценка согласно (5). Тогда весовой вектор «силы» собственников СП может быть задан согласно равенствам

$$\bar{\beta} = (\beta_{(1)}, \beta_{(2)}, \dots, \beta_{(K)}), \quad (6)$$

где

$$\beta_{(k)} = d_k^{-1} \setminus \sum_j d_j^{-1}.$$

Характеристики значимости собственников СП далее используются в моделях компромиссно-оптимальных решений НТЗСП.

3. Математические модели транспортной задачи при неоднородных по правам собственности средствах перевозки грузов

Математические модели НТЗСП зависят не только от представления свойств собственников СП, но и от полноты учета свойств собственников СП и требуемого типа решения распределительной задачи планирования. В зависимости от используемых ресурсов различаются следующие типы моделей НТЗСП:

- учет неоднородности грузов и средств перевозки;
- учет показателей прибыли и затрат, распределение эксплуатационных расходов;
- учет многократности перевозок, а также периода, за который необходимо рассчитать параметры компромисса между собственниками (многоэтапные модели НТЗСП).

Выделим следующие методики получения модели НТЗСП (формализации задачи):

- за счет редуцирования матрицы «расстояний» (1),
- включение дополнительных формализмов для представления компромиссных свойств задачи. Первый путь открывает возможность применения известных методов решения ТЗ, представленных в работе [1].

Остановимся на формулировке закрытой (в соответствии с классификацией [1]) модели при учете лишь неоднородности СП, когда задача планирования перевозки может быть представлена в виде:

$$F_C(\bar{X}) = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}^{(k)} C_{ij}^{(k)} \right) \Rightarrow \min_{x_{ij} \in D_X}, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K \left(\sum_{j=1}^n x_{ij}^{(k)} \right) = \sum_{k=1}^K a_i^{(k)}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^m x_{ij}^{(k)} \right) = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (9)$$

$$\sum_k \left(\sum_i a_i^{(k)} \right) = \sum_j b_j, \quad (10)$$

где $x_{ij}^{(k)}$ – объем перевозки из пункта A_i в B_j , $a_i^{(k)}$ – количество вагонов собственника k , в пункте A_i , b_j – потребность B_j .

Модель задачи (7)–(10) является обобщенной не только за счет ввода соответствующих дополнительных знаков суммирования, но и за счет редукции матрицы «расстояний» (1). Отметим несколько возможностей модификации матрицы (1), чтобы обеспечить возможность использования известных методов решения.

1. Редукция матрицы (1): представление и прибыли, и затрат

$$\hat{C}^{(k)} = \left\| \hat{C}_{ij}^{(k)} \right\|_{m,n}, \quad (11)$$

при

$$\hat{C}_{ij}^{(k)} = t_{ij}^{(k)} - e_{ij}^{(k)},$$

где $t_{ij}^{(k)}$ – удельный тариф перевозки; $e_{ij}^{(k)}$ – удельные эксплуатационные расходы.

Согласно (11) элементы матрицы представляют удельный доход от перевозки из A_i в B_j для собственника СП k .

2. Редукция модели ТЗ за счет увеличения числа строк m в матрице (1): для пункта отправления A_i количество строк равно числу собственников k_i , имеющих средства перевозки $a_i^{(k)}$ в этом пункте.

Для применения к НТЗСП с редуцированной матрицей (11) стандартных методов расчета плана достаточно исключить из рассмотрения те перевозки, которые выполняются некоторыми по заранее известным маршрутам.

Для представления в (11) не только показателей затрат и прибыли, но и предпочтений OK_k о направлениях перевозки, возможно использование структур (3), (6). В этом случае новые, модифицированные, матрицы расстояний будут иметь вид:

- задание вектора предпочтений

$$\hat{C}_i^{/(k)} = \hat{C}_{ij}^{(k)} / \alpha_j^{(k)}; \quad (12 a)$$

- матрица весовых коэффициентов

$$\hat{C}_i^{//(k)} = \hat{C}_{ij}^{(k)} / w_{ij}^{(k)}. \quad (12 б)$$

Компромиссно-оптимальная модель задачи НТЗСП с учетом распределения затрат и прибыли между собственниками имеют вид (7)

$$\text{opt}_{x \in D_x} \{F_C(\bar{X}), F_Q(\bar{X})\}, \quad (13)$$

где $F_Q(\bar{X})$ – показатель суммарной прибыли при матрицах вида $Q^{(k)} = \left\| q_{ij}^{(k)} \right\|$ в задаче

$$F_Q(\bar{X}) = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}^{(k)} q_{ij}^{(k)} \right) \Rightarrow \max_{x_{ij} \in D_x}. \quad (14)$$

Решения, оптимальные для частных показателей $\{F_C(\bar{X}), F_Q(\bar{X})\}$, не совпадают. Решение, задачи (14) в виде множества эффективных по Парето векторов-решений и соответствующих оценок показателей (13) достаточно легко может быть получено методом ограничений [2], предполагающем задание последовательности дополнительных ограничений на допустимые решения задачи в следующем виде:

$$F_Q(\bar{X}) \geq F_q^*, \quad (15)$$

где F_q^* – последовательность констант. Окончательный выбор решения из построенного согласно (13)–(15) эффективного множества реализуется за счет его неформального анализа.

При распределении между собственниками СП доходов (затрат) по модели побочных платежей [2] имеем следующее компромиссное решение НТЗСП:

$$F_Q^{(k)}(\bar{X}^*) = \hat{\beta}_{(k)} F_Q(\bar{X}^*), \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (16)$$

В (16) использованы весовые коэффициенты (6), а оптимальное решение задачи вида (14) получено стандартным методом [1] для редуцированной матрицы «расстояний» (11).

4. Транспортная задача с неоднородными по правам собственности средствами перевозки

Рассмотрим пример реализации НТЗСП с использованием модели (7)–(10). Данные для расчетов и результаты оптимального распределения вагонов представлены на рисунке. Исследован случай закрытой модели НТЗСП, когда количество вагонов в пунктах отправления равно количеству вагонов в пунктах назначения. Как следует из расчетов, учет предпочтений собственников СП является существенным и по значению целевой функции, и по оптимальному плану перевозки.

Транспортная матрица

Отпр\Назн	в1	в2	в3	в4	в5	в6	в7	в8	Наличие
а1	10	15	5	24	8	30	12	18	180
а2	8	20	30	15	16	10	25	6	250
а3	30	25	20	10	15	16	12	24	90
а4	20	10	5	12	22	36	24	9	330
а5	5	15	25	20	7	12	18	30	500
а6	15	10	8	12	30	20	25	16	420
Потребн.	200	150	320	100	400	250	80	270	1770

Собственники средств перевозки

Пункт\ Собств	Соб1	соб2	Соб3	Соб4	Всего в пункте
а1	30	30	50	70	180
а2	50	60	70	70	250
а3	0	0	40	50	90
а4	100	40	70	120	330
а5	20	200	150	130	500
а6	70	80	190	80	420
Всего	270	410	570	520	1770

Логистическая матрица (предпочтение по направлению движения транспортных средств)

Отпр\ Назнач	в1	в2	в3	в4	в5	в6	в7	в8
а1	0,1	0,25	0,15	0,2	0,05	0,05	0,1	0,1
а2	0,2	0,1	0,15	0,05	0,05	0,15	0,2	0,1
а3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
а4	0,15	0,15	0,05	0,15	0,15	0,15	0,15	0,05
а5	0,1	0,2	0,2	0,2	0,05	0,05	0,1	0,1
а6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3

Матрица решений. Показатель условных затрат на реализацию оптимального плана без учета предпочтений собственников – 123

Отпр\Назн	в1	в2	в3	в4	в5	в6	в7	в8	Наличие
а1	0	0	0	0	0	180	0	0	180
а2	0	0	0	100	150	0	0	0	250
а3	0	0	46	0	0	0	44	0	90
а4	0	0	60	0	0	0	0	270	330
а5	144	0	0	0	250	70	36	0	500
а6	56	150	214	0	0	0	0	0	420
Потребность	200	150	320	100	400	250	80	270	1770

Матрица решений. Показатель условных затрат на реализацию оптимального плана с учетом предпочтений собственников – 158 (ухудшение на 28,4 % для варианта без учета прав собственника)

Отпр\Назн	в1	в2	в3	в4	в5	в6	в7	в8	Наличие
а1	0	0	0	0	0	0	80	100	180
а2	0	0	0	0	0	250	0	0	250
а3	0	0	0	90	0	0	0	0	90
а4	0	0	160	0	0	0	0	170	330
а5	200	0	0	0	300	0	0	0	500
а6	0	150	160	10	100	0	0	0	420
Потребность	200	150	320	100	400	250	80	270	1770

Рис. Реализация транспортной задачи с несколькими собственниками средств перевозки

Выводы

В работе предложен и исследован новый класс транспортных задач, в рамках которого учитывается неоднородность средств перевозки по правам собственности. Показано, что учет этой дополнительной информации приводит к достаточно широкой совокупности векторных моделей математического программирования. В работе рассмотрены однородные по категории грузов перевозки; учету неоднородности и грузов, и собственников, а также ряда других факторов неоднородности средств перевозки, будет посвящена отдельная работа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ермольев Ю. М. Математические методы исследования операций / Ю. М. Ермольев, И. И. Ляшко, В. С. Михалевич и др. – К.: Вища шк., 1979. – 312 с.
2. Емельянов С. В. Модели и методы векторной оптимизации /Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. Т. 5 / С. В. Емельянов, В. В. Борисов, А. А. Малевич и др. – М.: ВИНТИ, 1973. С. 346–448.
3. Дзюбин Г. Н. Введение в прикладную теорию игр / Г. Н. Дзюбин, В. Г. Суздаль. – М.: Наука, 1984. – 334 с.

Поступила в редколлегию 14.10.2004 г.