

УДК 656.212: 519.6

А. Ю. ПАПАХОВ<sup>1\*</sup>, Н.А. ЛОГВИНОВА<sup>2\*</sup>, К.В. МАТВИЕНКО<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, г. Днепро, Украина, тел + 38 (067) 524-43-22, e-mail: papahova0362@gmail.com, ORCID 0000-0003-2357-8158

<sup>2\*</sup> Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, г. Днепро, Украина, тел + 38 (067) 524-43-22, e-mail: logvinovanata1987@gmail.com, ORCID 0000-0002-9350-881X

<sup>3\*</sup> Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, г. Днепро, Украина, тел + 38 (095) 792-11-75, e-mail: dissertaciaz@gmail.com, ORCID 0000-0001-9054-7824

## ЗАДАЧА РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Целью данной работы является разработка математических моделей и вычислительных методов рационального распределения пассажирских и грузовых поездов на сети железных дорог на основании векторной оптимизации с целью удовлетворения спроса пассажиров и грузоотправителей в зависимости от поездо-км пробега, времени движения поездов, механической работы по их перемещению. Основной задачей исследования является рациональное распределение размеров пассажирских и грузовых поездов на сети железных дорог на основании векторной оптимизации с целью удовлетворения спроса пассажиров и грузоотправителей в зависимости от поездо-км пробега, времени движения поездов, механической работы по их перемещению. Объектом исследования выступает сеть железнодорожного полигона с вершинами на технических станциях. Предметом исследования является распределение пассажирских и грузовых поездов на железнодорожной сети с учетом ограничений по перерабатывающей способности технических станций и пропускной способности перегонов. Научная новизна заключается в предложении нового метода рационального распределения пассажирских и грузовых поездов на сети железных дорог на основании векторной оптимизации. Получены необходимые условия для решения задачи рационального распределения размеров пассажирских и грузовых поездов на сети железных дорог. Практическая значимость. В результате предложенного подхода разработан экономико-математический вариант рационального распределения пассажирских и грузовых поездов на сети железных дорог на основании векторной оптимизации с целью удовлетворения спроса пассажиров и грузоотправителей в зависимости от поездо-км пробега, времени движения поездов, механической работы по их перемещению.

Ключевые слова: грузовые поезда, пассажирские поезда, теория функций множества, векторная оптимизация

### Постановка проблемы

От устойчивой работы железнодорожного транспорта напрямую зависит экономика Украины. Вместе с тем проводимые в стране кардинальные экономические реформы поставили перед железнодорожным транспортом ряд серьезных проблем. Переход от плановой экономической среды, для которой были отлажены системы организации вагонопотоков и управления перевозками, к рыночной, с четко выраженной долей частной собственности и повышенной финансовой ответственностью железных дорог за свою деятельность, ухудшил состояние железнодорожного транспорта.

Попытки содержать излишнюю инфраструктуру за счет повышения тарифов без кардинальных мер по изменению технологии на практике способствовали оттоку грузов значительной номенклатуры на автомобильный транспорт.

В настоящее время в отрасли наступило понимание, что кардинальное повышение эффективности работы железнодорожного транспорта, его конкурентоспособности на рынке транспортных услуг возможно лишь на основе широкой информатизации отрасли на базе современных средств связи и вычислительной техники. Однако надо иметь в виду, что с изменением экономических взаимоотношений в стране и переориентации задач железнодорожного транспорта, теория расчета вагонопотоков устарела.

Введение дневных ускоренных пассажирских поездов Интерсити и Интерсити+, закрытие отдельных станций и даже целых железнодорожных участков привел к тому, что по оставшейся инфраструктуре перевозок необходимо организовать движение грузовых и пассажирских поездов с целью удовлетворения спроса

пассажиры в зависимости от время движения поездов, механическая работа по перемещению поездов.

Существующие математические подходы дают возможность использовать методы интерактивного решения многокритериальных задач, которые отражают реальное состояние дел на участке сети железных дорог, а не формальную модель приведенных затрат.

### Анализ последних исследований

Порядок направления и организации движения поездов является важной технологической задачей эксплуатационной работы железнодорожного транспорта [1]. Размеры движения пассажирских и грузовых поездов на железнодорожных направлениях определяет уровень загрузки технических средств транспорта, распределение поездной, сортировочной и маневровой работы между станциями и пунктами отправления и назначение пассажирских и грузовых поездов [2].

С этой целью порядок направления пассажирских и грузовых поездов на железнодорожных направлениях ориентируется на экономические показатели, приведенные в [3].

Условия продвижения пассажирских и грузовых поездов по параллельным ходам приведено в работе [4].

В статье [5] приведено описание метода расчёта оптимальных многофазных схем грузоперевозок в предположении, что при стремлении операторских компаний к оптимизации перемещений своих вагонов, рано или поздно, компании должны будут использовать схемы грузоперевозок, совпадающие с теми, которые могут быть рассчитаны предлагаемым методом без учета размеров пассажирских перевозок. Фактически в статье речь идет о сложных задачах линейного программирования транспортно-го типа. В качестве метода решения этих задач рассматривается метод их сведения к задаче построения потока минимальной стоимости в подходящей транспортной сети.

Такой подход к транспортным задачам хорошо известен [6]. Однако сама модель оптимизационной задачи и эффективность предлагаемого метода решения могут представлять, определённый интерес для специалистов. Описанный в статье метод оптимального планирования железнодорожных грузоперевозок реализован нами в системе MATLAB. В конкретных задачах возникают довольно большие размеры.

Постановка и решение данной задачи как многокритериальной – позволяет полнее охватить различные аспекты организации поездопотоков.

Основанием для возможности применения различных математических моделей для решения задач оптимизации является понятие эквивалентности экстремальных задач, приведенных [7].

Цель. Целью данной работы является разработка математических моделей и вычислительных методов рационального распределения пассажирских и грузовых поездов на сети железных дорог на основании векторной оптимизации с целью удовлетворения спроса пассажиров и грузоотправителей в зависимости от поездок-км пробега, времени движения поездов, механической работы по их перемещению.

Основной задачей исследования рациональное распределение размеров пассажирских и грузовых поездов на сети железных дорог на основании векторной оптимизации с целью удовлетворения спроса пассажиров и грузоотправителей в зависимости от поездок-км пробега, времени движения поездов, механической работы по их перемещению.

### Изложение основного материала

В современных условиях основным направлением стабилизации грузового и пассажирского движения является создание новой системы организации управления его хозяйственной деятельностью, а главными задачами этой системы должны быть комплексное управление затратами, глубокое и постоянное изучение рынка перевозок и запросов пассажиров и грузоотправителей. Такая система наряду с удовлетворением запросов потребителей услуг позволит обеспечивать получение от данного вида деятельности максимальной прибыли и снижение себестоимости грузовых и пассажирских перевозок.

Модель сети железных дорог – является граф  $G(V, E)$ , где  $V$  – перечень пунктов сети,  $E$  – перечень ребер (отрезков пути) между пунктами.

Цель – рационально распределить перемещение поездопотоков между пунктами сети.

Показатели рациональности:

$P_1$  – поездок-км пробега;

$P_2$  – время движения поездов;

$P_3$  – механическая работа по перемещению поездов.

Исходная информация:

$P_{ij}$  – поездопоток пассажирских поездов;

$Q_{ij}$  – поездопоток грузовых поездов между

$i$  – м и  $j$  – м пунктами из перечня  $V$ .

$N(e)$  – пропускная способность ребра  $e \in E$ .

Ограничения. (Движение поездов - туда)

$$\sum_{w \in W_{ij}} X_{ijw} = P_{ij}; \quad i = \overline{1, n-1}; \quad i+1 \leq j \leq n$$

$$\sum_{w \in W_{ij}} Y_{ijw} = Q_{ij}; \quad i < j; \quad i = \overline{1, n-1}; \quad j = \overline{i+1, n} \quad (1)$$

$$\sum_{i, j \in V} \sum_{w \in W_{ij}} I_w(e) ((1+\alpha) X_{ij} + Y_{ij}) \leq N(e); \quad e \in E,$$

где  $W_{ij}$  – перечень простых путей  $w$  из  $i$  в  $j$ ;

$X_{ijw}$  – число пассажирских поездов из  $i$  в  $j$  по пути  $w$ ;

$Y_{ijw}$  – число грузовых поездов из  $i$  в  $j$  по пути  $w$ ;

$\alpha$  – доля грузовых поездов, которые снимаются одним пассажирским поездом, следующим по пути  $w$ .

Так каждое ребро  $e \in E$  характеризуется пятью числами:

$d(e)$  – длина ребра  $e$ ;

$t_p(e)$  – время движения пассажирского поезда по ребру  $e$ ;

$t_Q(e)$  – время движения грузового поезда по ребру  $e$ ;

$m_p(e)$  – механическая работа при движении пассажирского поезда по ребру  $e$ ;

$m_Q(e)$  – механическая работа при движении грузового поезда по ребру  $e$ .

Многокритериальные задачи имеют следующую характерную особенность: модель, описывающая множество допустимых решений, объективна, но качество решения оценивается по многим критериям. Для выбора наилучшего варианта решения необходим компромисс между оценками по различным критериям.

В условиях задачи отсутствует информация, позволяющая найти такой компромисс. Зависимости между критериями не могут быть определены на основе имеющейся объективной информации. Такие задачи относятся к числу слабо-структурированных задач. В них недостаток объективной информации принципи-

ально неустраним. Необходимы специальные средства анализа таких проблем.

К настоящему времени разработан ряд путей решения многокритериальных проблем.

Показатели рациональности вычисляются по формулам:

$$P_1 = \sum_{i, j \in V} \sum_{w \in W_{ij}} d(w) (X_{ijw} + Y_{ijw});$$

$$P_2 = \sum_{i, j \in V} \sum_{w \in W_{ij}} (t_p(w) X_{ijw} + t_Q(w) Y_{ijw}); \quad (2)$$

$$P_3 = \sum_{i, j \in V} \sum_{w \in W_{ij}} (m_p(w) X_{ijw} + m_Q(w) Y_{ijw}).$$

где

$$d(w) = \sum_{e \in w} d(e)$$

$$t_p = \sum_{e \in w} t_p(e); \quad t_Q = \sum_{e \in w} t_Q(e); \quad (3)$$

$$m_p = \sum_{e \in w} m_p(e); \quad m_Q = \sum_{e \in w} m_Q(e).$$

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

Задача 1.

$$P_1 \rightarrow \min \quad P_2 \leq \overline{P_2}; \quad P_3 \leq \overline{P_3};$$

Задача 2.

$$P_2 \rightarrow \min \quad P_1 \leq \overline{P_1}; \quad P_3 \leq \overline{P_3};$$

Задача 3.

$$P_3 \rightarrow \min \quad P_1 \leq \overline{P_1}; \quad P_2 \leq \overline{P_2};$$

где  $\overline{P_i}$  – максимально допустимое значение  $i$  – того показателя.

Задача 4.

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad P_3 \leq \overline{P_3};$$

Задача 5.

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_3 \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad P_2 \leq \overline{P_2};$$

Задача 6.

$$\begin{pmatrix} P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad P_1 \leq \overline{P_1};$$

Задача 7.

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} \rightarrow \min$$

Все сформулированные задачи решаются при ограничениях (1). Неизвестные распределения  $X_{ijw}$ ,  $Y_{ijw}$  должны быть определены.

Оценим размерность задач.

Если обозначить через  $|W_{ij}|$  – число простых путей  $w$  из пункта  $i$  в пункт  $j$ , то число неизвестных  $X_{ijw}$  будет равно:

$$\left. \begin{array}{ccc|c} i & j & & \\ 1 & 2 & \partial o n & n-1 \\ 2 & 3 & \partial o n & n-2 \\ \dots & \dots & & \dots \\ n-1 & n & & 1 \end{array} \right\} \frac{(n-1)n}{2} \cdot \max_{v,j} |W_{ij}|$$

$$1 \cdot |W_{n-1,n}| + |W_{n-2,n}| + |W_{n-3,n}| + \dots =$$

$$= \sum_{i < j} |W_{i,j}| = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n |W_{ij}|$$

Необходима оценка числа простых путей при заданном графе  $G(V, E)$  [8].

О свойствах  $d(e)$ ,  $t(e)$  и  $m(e)$ :

– все они больше 0;

– чем больше  $d(e)$  тем больше  $t(e)$  и  $m(e)$ ,

т.е. если  $d(e_1) \leq d(e_2)$ , то  $m(e_1) \leq m(e_2)$ .

Задачи 1-3 – это обычные задачи линейного программирования, а задачи 4-7 являются задачами векторной оптимизации в линейной постановке.

Рассмотрим задачу 4.

В пространстве функционалов  $(P_1, P_2)$  введем единичный вектор  $u$  с координатами:

$$u_1 = \cos \varphi;$$

$$u_2 = \sin \varphi;$$

и рассматриваем задачу

$$L = t \rightarrow \min$$

при условиях

$$P_1 = u_1 \cdot t;$$

$$P_2 = u_2 \cdot t;$$

$$P_3 \leq \bar{P}_3;$$

и плюс ограничения (1).

Перебирая угол  $\varphi$  с шагом  $\Delta\varphi$  в пределах от 0 до  $\frac{\pi}{2}$  получаем решения  $X_{ijw}(\varphi)$  и значения

$$P_1(\varphi), P_2(\varphi), P_3(\varphi).$$

Многокритериальные задачи допускают эффективное применение интерактивных процедур, при которых проводится исследование

множества допустимых вариантов в поиске оптимального (или близкого к оптимальному, рационального) решения. Интерактивные процедуры характеризуются поочередной сменой этапов вычислений и принятия решений. На каждой итерации для дальнейшего исследования генерируется решение или группа решений.

## Вывод

В работе предложен новый метод рационального распределения пассажирских и грузовых поездов на сети железных дорог на основании векторной оптимизации с целью удовлетворения спроса пассажиров и грузоотправителей в зависимости от поездо-км пробега, времени движения поездов, механической работы по их перемещению.

В основу математической модели положен принцип использования матрицы корреспондирующих пассажирских и грузовых поездопотоков, – в отличие от стандартно используемого построения множества корреспондируемых вагонов и дальнейшего формирования их в грузовые поезда. Для оптимизации вариантов организации поездопотоков, в роли которых выступают множества матриц корреспонденций, выбирается ряд критериев.

Численная реализация предложенного метода показала адекватность предложенного алгоритма и подтверждает правильность математического описания решения поставленной задачи.

Задача выбора рационального распределения пассажирских и грузовых поездов на сети железных дорог на основании векторной оптимизации с учетом технико-технологической структуры сети железных дорог формулируется как многокритериальная задача, которая технически может быть решена в условиях достаточного информационного обеспечения в реальном режиме времени.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ломотько, Д. В. Удосконалення системи управління парком вантажних вагонів на залізницях України в нових умовах / Д. В. Ломотько, В. М. Запара, В. В. Кулешов, А. В. Кулешов // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2010. – Вип. 119. – С.28-35.
2. Осминин, А. Т. Рациональная организация вагонопотоков на основе методов многокритериальной оптимизации : дис. ... д-ра техн. наук :05.22.08 / Осминин Александр Трофимович // – Самара, 2000, – 261 с.
3. Папахов, А. Ю. Использование метода функции множества при рациональной организации ва-

гонопотоков / А. Ю. Папахов // Транспортні системи та технології перевезень. – 2016. – Вип. 12. – С. 69-74. DOI: <http://dx.doi.org/10.15802/tstt2016/85887>

4. Логвінова, Н. О. Моделювання роботи залізничної інфраструктури з паралельними ходами [Текст] / Н. О. Логвінова, Р. В. Вернигора, О. Ю. Папахов // Науковий Вісник НГУ. – 2013. – Вип. 3. – С. 93-102.

5. Баушев, А. Н. Математическая модель многофазных железнодорожных грузоперевозок / А. Н. Баушев, А. Т. Осьмилин, Л. А. Осьмилин // Математическое моделирование. – 2013. – Т. 25. – Вып. 10. – С. 108-122.

6. Басакер, Р. Конечные графы и сети / Р. Басакер, Т. Саати. – Москва : Наука, 1974. – 368 с.

7. Баушев, А.Н. Оптимизационные задачи на сетях : Уч. пособие / А. Н. Баушев, Л. В. Гадасина. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2012. – 108 с.; ISBN 978-5-7641-0383-9

8. Андерсон, Джеймс А. Дискретная математика и комбинаторика : Пер. с англ. / Джеймс А. Андерсон. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 960 с.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Тараном И. А. (Украина)*

Поступила в редколлегию 10.11.2016.

Принята к печати 12.11.2016.

О. Ю. ПАПАХОВ, Н. О. ЛОГВИНОВА, Х. В. МАТВИЄНКО

## ЗАДАЧА РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЦЬ

**Метою** даної роботи є розробка математичних моделей і обчислювальних методів раціонального розподілу пасажирських і вантажних поїздів на мережі залізниць на підставі векторної оптимізації з метою задоволення попиту пасажирів і вантажовідправників в залежності від поїздо-км пробігу, часу руху поїздів, механічної роботи по їх переміщенню. **Основною задачею дослідження** є раціональний розподіл розмірів пасажирських і вантажних поїздів на мережі залізниць на підставі векторної оптимізації з метою задоволення попиту пасажирів та вантажовідправників в залежності від поїздо-км пробігу, часу руху поїздів, механічної роботи по їх переміщенню. **Об'єктом дослідження** виступає мережа залізничного полігону з вершинами на технічних станціях. **Предметом дослідження** є розподіл пасажирських і вантажних поїздів на залізничній мережі з урахуванням обмежень по переробній спроможності технічних станцій і пропускної спроможності перегонів. **Наукова новизна** полягає в пропозиції нового методу раціонального розподілу пасажирських і вантажних поїздів на мережі залізниць на підставі векторної оптимізації. Отримані необхідні умови для вирішення задачі раціонального розподілу розмірів пасажирських і вантажних поїздів на мережі залізниць. **Практична значимість.** В результаті запропонованого підходу розроблено економіко-математичний варіант раціонального розподілу пасажирських і вантажних поїздів на мережі залізниць на підставі векторної оптимізації з метою задоволення попиту пасажирів та вантажовідправників в залежності від поїздо-км пробігу, часу руху поїздів, механічної роботи по їх переміщенню.

*Ключові слова:* вантажні поїзда, пасажирські поїзда, теорія функцій багатьох, векторна оптимізація.

O. PARAKHOV, N. LOGVINOVA, K. MATVIENKO

## THE PROBLEM OF THE RATIONAL USE OF THE RAILWAY NETWORK

The **purpose** of this work is the development of mathematical models and computational methods for the rational distribution of passenger and freight trains on the network of railways on the basis of vector optimization in order to meet the demand for passengers and consignors, depending on the train-km mileage, travel time, Mechanical work on their movement. The **main objective** of the study is to rationally distribute the size of the Passau-Cairo and freight trains on the railway network on the basis of vector optimization in order to meet the demand of passengers and consignors, depending on the train-km mileage, the time of train movement, and the mechanical work on their movement. The **object of the study** is a network of a railway test site with peaks at technical stations. The **subject of the study** is the distribution of passenger and freight trains on the railway network, taking into account limitations on the processing capacity of technical stations and the carrying capacity of the distances. The **scientific novelty** consists in proposing a new method for rational distribution of passenger and freight trains on the railway network based on vector optimization. The necessary conditions have been obtained to solve the problem of rational distribution of the sizes of passenger and freight trains on the railway network. **Practical significance.** As a result of the proposed approach, an economical and mathematical variant of the rational distribution of passenger and freight trains on the railway network was developed on the basis of vector optimization in order to meet the demand of passengers and consignors, depending on train-km mileage, train travel time, Movement.

*Keywords:* freight trains, passenger trains, the theory of set functions, vector optimization.