

14. Dovgelyuk N.V., Akhramenko G.V., Verbilo V.A. Rekonstruktsiya zheleznykh dorog [The reconstruction of Railways]. Gomel', 2017. 339 p.
15. Turbin I.V. Podbor parametrov proektnoi krivoi v dekartovoi sisteme koordinat : ucheb. posobie [The selection of the parameters of the design curve in a Cartesian coordinate system: a study guide]. Moscow, 2003. 32 p.
16. Patlasov A.M. Ukladka strelochnykh perevodov na zhelezobetonnykh brus'yakh v krivykh uchastkakh puti [Laying switches on reinforced concrete beams in curved sections of the track]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport [Bulletin of BSUT: science and transport]*, 2002. Pp. 25–28 [Electronic media]. URL: <https://www.bsut.by/en/science-eng/scientific-publications/vestnik-en>
17. Kaznacheev E.A. Plavnost' khoda poezdov v krivykh malykh radiusov [Smooth running of trains in curves of small radii]. *Put' i putevoe khozyaistvo [Track and track facilities]*, 2018. No. 7. Pp. 10–12.
18. Romanov A.V. Prichiny narusheniya plavnosti khoda poezdov [The reasons for the violation of the smooth running of trains]. *Put' i putevoe khozyaistvo [Track and track facilities]*, 2020. No. 7. Pp. 29–31.

#### Информация об авторах

**Романенко Виктория Владимировна** – старший преподаватель кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь, e-mail: [vromanenko@mail.ru](mailto:vromanenko@mail.ru)

#### Information about the authors

**Viktorya V. Romanenko** – Senior Lecturer of the Subdepartment of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, The Belarusian State University of Transport, Gomel, the Republic of Belarus, e-mail: [vromanenko@mail.ru](mailto:vromanenko@mail.ru)

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).135-141

УДК 656.2

## Оптимизация работы грузового железнодорожного транспорта с использованием смешанно-целочисленной нелинейной модели

О. А. Лебедева✉

Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

✉ [kravhome@mail.ru](mailto:kravhome@mail.ru)

#### Резюме

В статье рассматривается смешанно-целочисленная модель, позволяющая решать задачи маршрутизации относительно железнодорожной сети. В качестве исходных данных используется транспортная железнодорожная сеть с постоянными маршрутами пассажирских и грузовых поездов, в каждом из которых приведена пара станций – отправления и назначения. Цель исследования – поиск всех возможных вариантов составления путей объезда при минимизации времени движения и оптимизации всего транспортного цикла. Ранее исследование в этой области проводилось относительно микроскопических железнодорожных коридорами. В нашем исследовании рассмотрим задачу маршрутизации железнодорожной сети в макроскопической транспортной сети. Под такой сетью понимается объединение сложных транспортных структур в более простые сети. Время отправления и прибытия принимается равным заданному интервалу. Можно отнести задачи такого плана к стратегическим, так как решение требует грубой маршрутизации при применении смешанно-целочисленного нелинейного программирования. Модель товарного потока представляется в виде графа с дополнительными ограничениями. Нелинейность модели обусловлена аппроксимацией задержек железнодорожных составов на дугах сети и функциями ограничения пропускной способности. Решение задачи сводится к смешанной целочисленной линейной модели минимизации времени.

#### Ключевые слова

транспорт, железнодорожные перевозки, пропускная способность, многотоварные потоки, программирование

#### Для цитирования

Лебедева О.А. Оптимизация работы грузового железнодорожного транспорта с использованием смешанно-целочисленной нелинейной модели / О.А. Лебедева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 135–141. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).135-141

#### Информация о статье

поступила в редакцию: 22.01.2021, поступила после рецензирования: 13.02.2021, принята к публикации: 17.02.2021

## Optimization of the operation of freight rail transport using a mixed-integer nonlinear model

О. А. Lebedeva✉

Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉ [kravhome@mail.ru](mailto:kravhome@mail.ru)

**Abstract**

The article discusses a mixed-integer model that allows solving routing problems relative to the railway network. As the initial data, a transport railway network with permanent routes of passenger and freight trains is used, each of which contains a pair of stations: those of departure and destination. The purpose of the study is to search for all possible options for drawing up bypass routes, while minimizing travel time and optimizing the entire transport cycle. Previously, research in this area was carried out with reference to microscopic rail routes at large stations. Recent developments are aimed at experimenting with larger transport corridors. In our study, we will consider the problem of routing a railroad network in a macroscopic transport network. Such a network is understood as the integration of complex transport structures into simpler networks. Departure and arrival times are assumed to be equal to the specified interval. It is possible to classify problems of this kind as strategic, since their solution requires rough routing when using mixed-integer nonlinear programming. The product flow model is presented as a graph with additional restrictions. The nonlinearity of the model is conditioned by the approximation of train delays on the arcs of the network and through capacity limiting functions. The solution to the problem is reduced to a mixed integer linear time minimization model.

**Keywords**

transport, rail transportation, throughput capacity, multi-commodity flows, programming

**For citation**

Lebedeva O. A. Optimizatsiya raboty gruzovogo zheleznodorozhnogo transporta s ispol'zovaniem smeshanno-tselochislennoi nelineinoi modeli [Optimization of the operation of freight rail transport using a mixed-integer nonlinear model]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.135–141.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).135-141

**Article info**

Received: 22.01.2021, Revised: 13.02.2021, Accepted: 17.02.2021

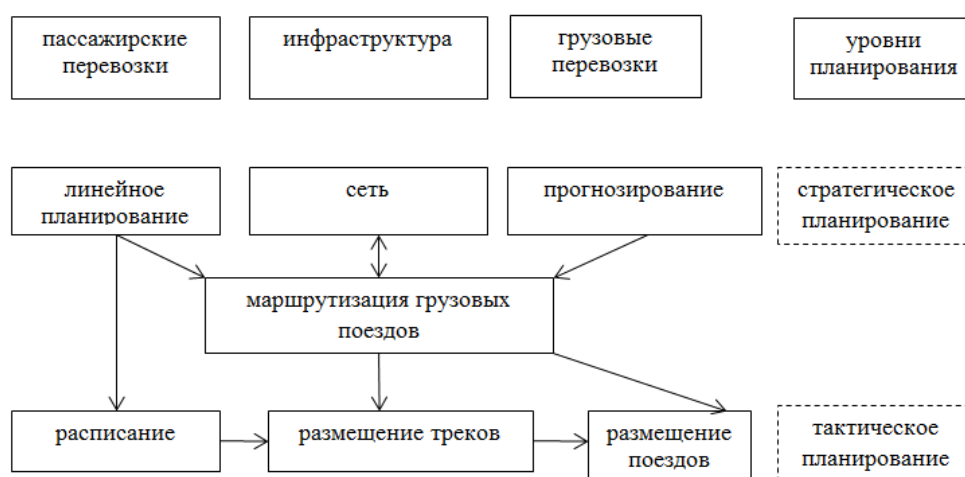
**Введение**

В практике железнодорожных перевозок за последние десятилетия отмечается увеличение объема перевозок, но развитие соответствующей инфраструктуры не успевает за такими темпами, поскольку ее обновление всегда является дорогостоящим и долгосрочным проектом. Для максимального использования инфраструктуры необходимо определить узкие места в сети. Одна из важных частей исследования – поиск маршрутов, неудовлетворяющих потребности в перевозках. Следовательно, для оптимизации транспортной сети необходимо провести анализ с целью получения реальной оценки и распределения имеющейся емкости [1–5]. Основная цель – опреде-

ление маршрутов грузовых поездов с учетом железнодорожной инфраструктуры и уже запланированного и неизменного пассажирского движения.

**Исследования методов решения транспортных задач**

Маршрутизация пассажирских и грузовых перевозок имеет важные отличия, которые необходимо учитывать при моделировании транспортной сети. Одним из главных являются интервалы времени отправления и прибытия, которые в грузовых перевозках задаются не строго, и отсутствие ограничений на промежуточных станциях. Однако необходимо понимать, что грузовые и пассажирские перевозки используют одну и ту



**Рис. 1.** Модель маршрутизации грузовых перевозок в железнодорожной системе  
**Fig.1.** A model for routing freight traffic in the railway system

же инфраструктуру, и железнодорожный транспорт принято рассматривать в целом для обеспечения стратегического планирования и моделирования в реальном режиме времени (рис. 1).

Пути движения грузовых поездов в железнодорожной сети должны быть запланированы и интегрированы в годовое расписание. Множество исследований посвящено составлению расписания или распределению путей, которые, в частности, предполагают маршруты грузовых поездов в качестве входных данных [6–9]. Известны различные подходы к решению задач: G. Cairni представляет подход управления железнодорожной сетью с использованием априорной декомпозиции в различных зонах [10]; T. Schlechte предлагает определение макроскопической модели железной дороги на основе микроскопического моделирования [11]. Крупнейшая железнодорожная компания Германии «Deutsche Bahn» предлагает два варианта транспортировки в случае крупных отправок по железнодорожной сети. Первый вариант – это отправка железнодорожным поездом от 20 до 40 вагонов. В этом случае перевозчик может тянуть такой составной поезд локомотивом из пункта отправления в пункт назначения. Это предложение о прямых грузовых перевозках с фиксированным составом поездов. Альтернативный вариант, когда происходит отправка грузов мелкими партиями в отдельных автомобилях. В таком варианте отправка на отдельном локомотиве по сети не целесообразна, эффективнее осуществить перевозку только до сортировочной станции. Далее происходит группировка с вагонами других клиентов, а затем по мере прибытия (отправления) поездов на следующую сортировочную станцию. Поезда разбирают, а машины снова группируются, пока каждая не достигнет своего конечного пункта назначения. Это второй вариант грузовых отправок. Такие задачи требуют проектирования сети, то есть расположения сортировочных станций и вариантов отправок между ними. Результаты объединения более мелких отправок в один вагон на практике показывают положительный эффект.

Оптимизации работы железной дороги сформулирована как крупномасштабная, многопрофильная задача проектирования потоковой сети и маршрутизации с огромным числом переменных решений [12, 13]. R.K. Ahuja предложен алгоритм, использующий крупномасштабный поиск для железнодорожной отрасли [14]. Авторы в своих исследованиях доказывают применимость такого подхода для поиска оптимального решения. E. Köhler представляет математическую теорию зависимых от потока функций затрат [15]. Основное отличие заключается в том, что в дорожном движении маршрутизация децентрализована, а в железнодорожных системах централизована. Поток поездов нельзя разделить произвольно, следовательно, маршрут и расписание являются более жесткой системой по сравнению с потоком вагонов.

Рассмотрим стратегическую задачу маршрутизации в макроскопической транспортной сети. Макроскопическими называются сложные структуры, разделенные на системы с меньшим количеством элементов, с заданным временем отправления (прибытия). Задача имеет стратегический характер, поскольку в ней учитываются интервалы движения, а не точное время, т. е. входные данные – грубые оценки. Для эффективной работы железнодорожной транспортной сети рассмотрим метод нелинейной оптимизации с двумя возможными вариантами направления поездов из узла U в узел V (рис. 2). Если путь через X короче пути через Y, то линейные модели будут стремиться направлять все поезда от U к V по кратчайшему пути до тех пор, пока пропускная способность не нарушится. Оптимальное решение показано в виде жирной линии (рис. 2, б).

Оптимизационная модель, использующая нелинейную целевую функцию, приводит к сбалансированному решению (рис. 2, в). Основным достоинством такой модели является автоматическое определение путей проезда не удовлетворяющих условиям пропускной способности и предложение вариантов проектирования железнодорожной сети. Рассмотрим функции ограничения емкости.

Моделирование пропускной способности железной дороги технически сложная задача, поэтому прогнозирование загруженности и времени ожидания являются актуальным направлением исследований. Время ожидания практически не учитывается во время процедуры обработки емкости инфраструктуры. При достижении предела пропускной способности происходит перегрузка сети, которая обусловлена временными задержками, соответственно средняя задержка каждого поезда также начинает возрастать.

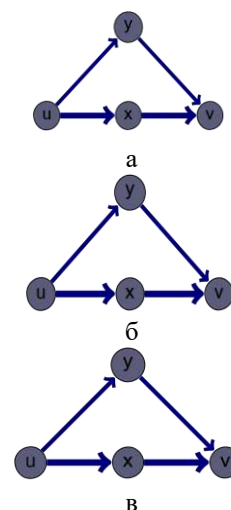


Рис. 2. Возможные варианты направления железнодорожных потоков  
Fig. 2. Possible options for the direction of railway flows

Моделирование количества поездов, проходящих через дугу, заключается во введении функции ограничения пропускной способности (CR), которая устанавливает предел средней задержки. Исследованиями в этой области занимались Irwin, Wohl, описывая с ее использованием характеристики поездки или времени в пути [16, 17]. J. Lieberherr и E. Pritscher предложили использовать CR-функции в железнодорожном пассажирском транспорте [18]. Рассмотрим применение функции в грузовом железнодорожном транспорте. Загрузка или задержка в таком случае определяется как

$$\tau \left( 1 + a \left( \frac{n}{k \cdot \gamma} \right)^\beta \right) * \alpha, \beta \in [0, \infty[ \quad \gamma \in ]0, \infty[, \quad (1)$$

где время работы  $\tau$  и вместимость  $k$  зависят от маршрута;  $\alpha, \beta, \gamma$  – параметры для CR-функции;  $\alpha$  – время работы поезда при достижении предельной пропускной способности. Выбираем  $\alpha = 1$ , необходимость оплатить время движения поезда, если произойдет полная загрузка подвижного состава,  $\gamma$  – резервная емкость. Поскольку не предоставляем возможность выбора емкости, то  $\gamma = 1$ .

Упростим CR-функцию:

$$\tau \left( 1 + \frac{n}{k} \right)^\beta. \quad (2)$$

Контролирует скорость наложения штрафа –  $\beta$ . Время выполнения заявки уже указано в целевой функции, поэтому в качестве стоимости времени ожидания берется только время свыше планового. Функция применяется для оценки загруженности на каждом пути следования:

$$f(n) = \tau \left( \frac{n}{k} \right)^\beta. \quad (3)$$

В общем виде транспортная сеть представлена в виде ориентированного графа  $GI = (VI, AI)$ . Узел  $V \in VI$  представляет собой станцию (объект) инфраструктуры, где берут начало или завершаются маршруты железнодорожного транспорта. Между узлами существует направленная дуга, если они соединены железнодорожным полотном.

Предположим равный спрос, разделенный на временные отрезки, расположенные в циклическом порядке, в конце дня – последний срез, в начале следующего дня – первый срез. Обозначим набор временных интервалов –  $S$ ;  $Is$  – временный интервал;  $k_a, a \in AI$ , – значение пропускной способности, которое описывает приблизительное количество поездов, которые могут использовать этот путь в течение суток; набор стандартных типов поездов с характеристиками –  $\tau$ ;  $la$  – длина дуги;  $\tau_{t,a}$ , – время движения поезда типа  $t \in \tau$  (поезда подразделяются на набор стандартных типов поездов  $T$  с особыми характеристиками, зависящими от пути и динамики движения). Для каждой дуги  $a \in AI$ ,  $la$  обозначает длину дуги,  $a$ ; спрос на грузовые поезда –  $R$ . Поезд  $r \in R$  связан со станцией отправления, станцией назначения, временным интервалом отправления и

типом поезда  $tr$ . Срез времени прибытия не ограничен. Время выполнения поездки и длина маршрута ограничиваются значением кратчайшего пути, обозначаемого как  $\Delta_{time}^r$  и  $\Delta_{dist}^r$ , соответственно. Пассажиропотоки выражаются количеством поездов за временной интервал.

Полагается, что поезд, проходящий в каждом узле графа, осуществляет выбор дальнейшего пути, т. е. резкие углы поворота либо запрещены, либо требуют дополнительной платы. Поскольку в модели заложено дополнительное ограничение на поток, которое сложно сформулировать на двойном графе, при решении необходимо придерживаться исходного варианта.

Предполагается, что даны два непересекающихся множества. Первый набор TF состоит из троек узлов  $(u, v, w)$  с  $(u, v), (v, w) \in AI$ , таких, что последовательность узлов  $u, v, w$  запрещена для всех поездов. В общем случае тройка  $(u, v, u)$  для  $(u, v) \in AI$  принадлежит набору, так как не разрешается покидать станцию в том направлении, с которого она прибыла. Второй набор TR состоит из тройки узлов  $(u, v, w)$  с  $(u, v), (v, w) \in AI$ , такой, что поворот от  $(u, v)$  к  $(v, w)$  в  $v$  происходит с дополнительными затратами  $C_{u,v,w}$  в целевой функции. В некоторых случаях тройка  $(u, v, u)$  для  $(u, v) \in AI$  принадлежит набору, если есть возможность перебросить локомотив с одного конца поезда на другой. В этом случае поезд может изменить направление и покинуть станцию  $v$  в том же направлении, откуда он прибыл.

Обозначим через  $\deg(v)$  сумму всех дуг, входящих или выходящих из узла  $v$ . Строится расширение графа  $GI = (VI, AI)$ , которое способно обрабатывать ограничения поворота. Для каждого узла  $v \in GI$  введем  $2 \deg(v)$  множества. Обозначим их через  $vw, w$  и  $vw, v$  для каждого  $(v, w), (w, v) \in AI$ . Введем дугу  $(vu, v, vw, w)$  между двумя новыми узлами, когда  $(u, v, w) \notin TF$ . Это дополнительные дуги с нулевой длиной и временем работы  $C_{u,v,w}$  когда TR содержит  $(u, v, w)$ . Каждая дуга  $a = (u, v) \in AI$  превращается в  $(uu, v, vu, v)$  в развернутом графике и имеет те же свойства, что и соответствующая дуга в  $GI$ . Построенный таким образом граф обозначается  $Gx = (VX, AX)$ .

Для стратегического планирования необходима информация о фактическом расписании поездов, использующих общий элемент сети и идущих в одном временном интервале. Поэтому для каждого пути определяются функция стоимости заторов  $fa: 2R \rightarrow IR^+$ , которая зависит от состава поездов, использующих соответствующий путь. Это измеряет ожидаемую задержку. Основная часть этой функции – CR-функция, остальные части – время работы и длина.

Определенные маршруты должны минимизировать сумму всех ожидаемых задержек, а также время и длину выполнения. Ограничения вместимости дуг неявно обрабатываются функцией перегрузки, то есть

потенциальные конфликты поездов, использующих один и тот же элемент инфраструктуры, приводят к большим значениям перегрузки. Минимизируя сумму задержек, увеличиваем вероятность бесперебойной дороги железнодорожной инфраструктуры.

### Смешанно-целочисленная нелинейная модель грузовых перевозок

Для моделирования задачи строится расширенный граф  $G$  срезов времени. Для каждого узла  $v \in V_x$  и для каждой дуги  $a \in A_x$  существует временной интервал  $s \in S$  в  $G$ . Расширенный по времени граф  $G$  содержит  $|S|$  варианты графа  $G_x$  и дополнительные дуги перехода  $vs_1, vs_2, \dots, vs_k$  и  $k = |S|$ , а дуги  $(vs_i, vs_{i+1})$  для  $i = 1, \dots, k-1$  и  $(vs_k, vs_1)$  представляют переход от одного временного интервала к другому в  $v$ . Узлы и дуги графа во временном интервале  $G$  обозначаются через  $V$  и  $A$ . Длина и время работы непереходных дуг берутся из  $G_x$ . Дуги перехода имеют нулевую длину и время работы, определяющиеся как промежуток времени, с которого начинается дуга. Обозначим заданное количество пассажирских поездов, пересекающих дугу  $a$  –  $\kappa_a$ ,  $a \in A_x$  по временным квантам в зависимости от длин временных интервалов. Для каждого запроса  $o(r) \in V$  – узел отправления в расширенном графе. Так как время прибытия не ограничено, то существует целевой узел для каждого временного интервала. Набор узлов назначения обозначается  $D_r$ .

На основе такого графа, возможно моделирование дуг для различных вариантов отправления. Для этого применяют двоичную переменную  $x_a^r$  для каждой дуги  $a \in A$  и каждого  $r \in R$ . Переменная равна 1, когда поезд  $r$  использует дугу  $a$ , в противном случае переменная равна 0.

Пусть  $x \in \{0, 1\}$ ,  $A, R$  – вектор переменных. Целевая функция содержит общую стоимость нелинейных перевозок для каждого пути, а также сумму времени и длины всех пробегов. Стоимость каждой операции –  $\lambda_{wait}$ ,  $\lambda_{running}$ ,  $\lambda_{length}$ ;  $\tau_a$  – среднее время работы на дуге по всем типам поездов:

$$\min \lambda_{wait} \sum_{v \in A} \tau_a \left( \frac{\sum_{r \in R} x_a^r}{\kappa_a} \right)^\beta + \lambda_{time} \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_a^r \tau_{t,a} + \lambda_{length} \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_a^r l_a. \quad (4)$$

В узлах учитывается требование, относительно сохранения потока:

$$\sum_{a \in \delta^+(v)} x_a^r - \sum_{a \in \delta^-(v)} x_a^r = 0 \quad \forall r \in R \quad \forall v \in V \setminus (o(r) \cup D(r)). \quad (5)$$

### Список литературы

1. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Моделирование грузовых перевозок в транспортной сети // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2016. № 10. С. 182–184.
2. Лебедева О.А., Крипак М.Н. Развитие городских грузовых систем с учетом концепции городского планирования // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 244–247.
3. Лебедева О.А. Применение интеллектуальных транспортных систем в области управления грузовыми перевозками // В сборнике: Развитие теории и практики автомобильных перевозок, транспортной логистики. сборник научных трудов кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» в рамках Международной научно-практической конференции. Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ). 2016. С. 102–107.

Общие ограничения потока для каждого поезда, относительно начала координат:

$$\sum_{a \in \delta^+(o(r))} x_a^r = 1 \quad \forall r \in R. \quad (6)$$

Приток должен быть на одном из узлов назначения в расширенном по времени графе:

$$\sum_{v \in D_r} \sum_{a \in \delta^-(v)} x_a^r = 1 \quad \forall r \in R. \quad (7)$$

Поезд должен перейти на следующий временной интервал, если время работы больше, чем временной интервал:

$$\sum_{a \in A(s)} \tau_{t,a} x_a^r \leq \tau_s^{len} \quad \forall s \in S, \forall r \in R. \quad (8)$$

Ограничение на длину и время работы:

$$\sum_{a \in A} l_a x_a^r \leq \Delta_{dist}^r \quad \forall r \in R \quad (9)$$

$$\sum_{a \in A} \tau_{t,a} x_a^r \leq \Delta_{time}^r \quad \forall r \in R$$

$$x_a^r \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A \quad \forall r \in R. \quad (10)$$

### Заключение

Для решения задачи маршрутизации грузовых перевозок необходима предварительная обработка сети для каждого поезда и нахождение дуг и узлов, которые не являются частью возможного решения.

Очевидно, что все входящие дуги исходного узла и все исходящие дуги конечных узлов можно игнорировать. Основная часть предварительной обработки состоит в сокращении сети поезда до подмножества дуг и узлов, которые являются элементами пути от исходной точки до одного из пунктов назначения, и соблюдают ограничения по длине и времени работы. Для того чтобы найти соответствующие подмножества дуг и узлов строится одно дерево кратчайших путей из исходной точки и другое из конечного узла. Затем для каждого узла проверяется, меньше ли расстояние от исходного до конечного узла относительно ограничения длины. Если расстояние меньше ограничения, то узел может быть решением, в противном случае – не может быть с учетом ограничения на длину пути. То же самое делается с ограничением времени работы. Определив для каждого поезда соответствующее подмножество дуг, получим значительное сокращение переменных потока.

В результате, можно сделать вывод, что задачи маршрутизации железнодорожных путей сообщения возможно решить методами нелинейного программирования. Это позволяет значительно сокращать трудоемкость расчетов и предоставляет возможность использовать решение для транспортного планирования работы сети в целом.

4. Лебедева О.А., Полтавская Ю.О., Гаммаева З.Н., Кондратенко Т.В. Транспортная инфраструктура как основополагающий фактор эффективного функционирования экономики страны // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2018. Т. 1. № 15. С. 125–130.
5. Полтавская Ю.О. Оптимизация транспортной сети на основе минимума общих затрат на доставку грузов // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 178–183.
6. Полтавская Ю.О. Методы сбора данных о продолжительности движения на маршруте и требования к объему выборки // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2018. № 12. С. 192–195.
7. Михайлов А.Ю., Копылова Т.А. Система критериев оценки транспортно-пересадочных узлов // Вестник ИрГТУ. 2015. № 7 (102). С. 168–174.
8. Гозбенко В.Е. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажиро- и грузопотоков / В.Е. Гозбенко, А.Н. Иванков, М.Н. Колесник, А.С. Пашкова. депонированная рукопись № 330-В2008 17.04.2008.
9. Гозбенко В.Е., Крипак М.Н., Иванков А.Н. Совершенствование транспортно-экспедиционного обслуживания грузовладельцев. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2011. 176 с.
10. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. Pp. 427–433.
11. Caimi G. Algorithmic decision support for train scheduling in a large and highly utilised railway network. PhD thesis, ETH Zurich. 2009.
12. Schlechte T., Borndörfer R., Erol B., Graffagnino T., Swarat E. Micro-macro transformation of railway networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2011.
13. Jha K.C., Ahuja R.K., Şahin G. New approaches for solving the block-to-train assignment problem. *Networks*, 2008. Vol. 51. No. 1. Pp. 48–62.
14. Barnhart C., Jin H., Vance P. H. Railroad blocking: A network design application. *Oper. Res.*, 2000. Vol. 48. No. 4. Pp. 603–614.
15. Ahuja R.K., Jha K.C., Liu J. Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*, 2007. Vol. 37. No. 5. Pp. 404–419.
16. Köhler E., Möhring R.H., Skutella M. Traffic networks and flows over time. In Lerner, J., Wagner, D., and Zweig, K. A., editors, *Algorithmics of Large and Complex Networks: Design, Analysis, and Simulation*, volume 5515 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 166–196. Springer, 2009.
17. Irwin N., Cube H.V. Capacity restraint in multi-travel mode assignment programs. *Highway Research Board Bulletin*, 1962. No. 347. Pp. 258–287.
18. Wohl M. Notes on transient queuing behavior, capacity restraint functions, and their relationship to travel forecasting. *Papers in Regional Science*, 1968. Vol. 21. No. 1. Pp. 191–202.
19. Lieberherr J. Pritscher E. Capacity-restraint railway transport assignment at SBB-Passenger. In *Proceedings of the 12th Swiss Transport Research Conference*, 2012.

### References

1. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Modelirovanie gruzovykh perezovok v transportnoi seti [Modeling of freight traffic in the transport network]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2016. No. 10. Pp. 182–184.
2. Lebedeva O.A., Kripak M.N. Razvitie gorodskikh gruzovykh sistem s uchetom kontseptsii gorodskogo planirovaniya [Development of urban cargo systems taking into account the concept of urban planning]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Scientific papers collection of Angarsk State Technical University]*, 2016. Vol. 1. No. 1. Pp. 244–247.
3. Lebedeva O.A. Primenenie intellektual'nykh transportnykh sistem v oblasti upravleniia gruzovymi perezovkami [The use of intelligent transport systems in the field of freight traffic management]. *V sbornike: Razvitie teorii i praktiki avtomobil'nykh perezovok, transportnoi logistiki. sbornik nauchnykh trudov kafedry «Organizatsiya perezovok i upravlenie na transporte» v ramkakh Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Sibirskaya gosudarstvennaya avtomobil'no-dorozhnaya akademiya (SibADI) [In the collection: Development of the theory and practice of road transport, transport logistics. Proceedings of the Department "Organization of Transportation and Transport Management" in the framework of the International Scientific and Practical Conference. Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), 2016]*. Pp. 102–107.
4. Lebedeva O.A., Poltavskaya Yu.O., Gammaeva Z.N., Kondratenko T.V. Transportnaya infrastruktura kak osnopolagayushchii faktor effektivnogo funktsionirovaniya ekonomiki strany [Transport infrastructure as a fundamental factor in the effective functioning of the country's economy]. *[Collection of scientific works of the Angarsk State Technical University]*, 2018. Vol. 1. No. 15. pp. 125–130.
5. Poltavskaya Yu.O. Optimizatsiya transportnoi seti na osnove minimuma obshchikh zatrat na dostavku gruzov [Optimization of the transport network based on the minimum total costs for the delivery of goods]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2019. No. 13. Pp. 178–183.
6. Poltavskaya Yu.O. Metody sbora dannykh o prodolzhitel'nosti dvizheniya na marshrute i trebovaniya k ob'emnykh vyborke [Methods for collecting data on the duration of traffic on the route and requirements for the sample size]. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Angarsk State Technical University]*, 2018. No. 12. Pp. 192–195.
7. Mikhailov A.Yu., Kopylova T.A. Sistema kriteriev otsenki transportno-perezadochnykh uzlov [System of criteria for assessing transport interchange hubs] *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2015. No. 7 (102). Pp. 168–174.

8. Gozbenko V.E., Ivankov A.N., Kolesnik M.N., Pashkova A.S. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoi seti s uchetom moshchnosti passazhiro- i gruzopotokov. Deponirovannaya rukopis' No. 330-V2008 17.04.2008 [Methods for forecasting and optimization of the transport network taking into account the capacity of passenger and cargo flows. Deposited manuscript No. 330-B2008 17.04.2008].

9. Gozbenko V.E., Kripak M.N., Ivankov A.N. Sovershenstvovanie transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev [Improvement of the transport and freight forwarding service of freight owners]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011. 176 p.

10. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*, 2018. Vol. 36. Pp. 427–433.

11. Caimi G. Algorithmic decision support for train scheduling in a large and highly utilised railway network. PhD thesis, ETH Zurich, 2009.

12. Schlechte T., Borndörfer R., Erol B., Graffagnino T., Swarat E. Micro-macro transformation of railway networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2011.

13. Jha K.C., Ahuja R.K., Sahin G. New approaches for solving the block-to-train assignment problem. *Networks*, 2008. Vol. 51. No. 1. Pp. 48–62.

14. Barnhart C., Jin H., Vance P. H. Railroad blocking: A network design application. *Oper. Res.*, 2000. Vol. 48. No. 4. Pp. 603–614.

15. Ahuja R.K., Jha K.C., Liu J. Solving real-life railroad blocking problems. *Interfaces*, 2007. Vol. 37. No. 5. Pp. 404–419.

16. Köhler E., Möhring R.H., Skutella M. Traffic networks and flows over time. In Lerner J., Wagner D., and Zweig K. A. (eds.) *Algorithmics of Large and Complex Networks: Design, Analysis, and Simulation, volume 5515 of Lecture Notes in Computer Science*, pages 166–196. Springer, 2009.

17. Irwin N., Cube H.V. Capacity restraint in multi-travel mode assignment programs. *Highway Research Board Bulletin*, 1962. No. 347. Pp. 258–287.

18. Wohl M. Notes on transient queuing behavior, capacity restraint functions, and their relationship to travel forecasting. *Papers in Regional Science*, 1968. Vol. 21. No. 1. Pp. 191–202.

19. Lieberherr J., Pritscher E. Capacity-restraint railway transport assignment at SBB-Passenger. In *Proceedings of the 12th Swiss Transport Research Conference*, 2012.

#### Информация об авторах

Лебедева Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: kravhome@mail.ru

#### Information about the authors

Ol'ga A. Lebedeva – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Subdepartment of Management of Automobile Transport, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: kravhome@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).141-148

УДК 625.172

## Анализ планирования технологических процессов производства путевых работ железнодорожного транспорта в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой

Т. Н. Асалханова<sup>1</sup>, А. А. Осколков<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ di\_oskolkovaa@esrr.ru

#### Резюме

Разработка и реализация требований по определению и подтверждению надежности, эксплуатационной готовности, В статье рассматриваются проблемы, возникающие при планировании технологических процессов производства путевых работ, в том числе с учетом Положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений, а также при отражении видов планирования путевых работ в системе единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой. Для исследования проблем планирования проводился анализ внесения данных о планировании технологических процессов путевых работ дистанциями пути Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры. При проведении анализа выявлено, что в настоящее время планирование технологических процессов производства путевых работ в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой имеет много недостатков, так как предприятия выполняют один из критериев Положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений – трудозатраты по продуктивным запланированным рабочим заданиям по месячному плану должны составлять не менее 50 % от общих трудозатрат, рассчитанных на списочный состав бригады на дату планирования. Это приводит к некоторым формальностям при планировании. При этом не учитываются факторы, влияющие на элементы пути, которые фиксируются не только в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой, но и в других корпоративных информационных системах. В результате исследования предложена модель методики планирования путевых работ с использованием