

Динамическое моделирование оптимального маршрута в мультимодальной транспортной сети

О. А. Лебедева✉

Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

✉ kravhome@mail.ru

Резюме

Оптимизация маршрутной транспортной системы широко изучалась для улично-дорожной сети, но менее апробирована в системе городского общественного транспорта. Мультимодальные маршрутные сети, проложенные по кратчайшему пути, могут снизить производительность системы в момент достижения максимума пропускной способности. Основной задачей исследования является разработка динамической модели оптимальной маршрутной системы для мультимодальной транспортной сети. Она представляется ориентированным графом с множеством узлов и дуг, который моделируется как многоуровневая структура, где каждый уровень представляет унимодальную подсеть и соединен линиями. Имитация работы сети моделируется с целью воспроизведения передвижений пассажиров, транспортных операций и поездок транспортных средств. Задача оптимизации динамической системы сформулирована как проблема вариационного неравенства для равновесия пользователя с точки зрения зависимых от времени предельных издержек. Расчет нестационарных предельных издержек пути основан на дополнительном времени ожидания пассажиров из-за отказа в посадке на прибывающие транспортные средства. Следовательно, путь представлен ациклическим направленным маршрутом на многоуровневом ориентированном графе, соединяющем пару пунктов отправления – назначения. Пересадка рассматривается в связи с ограничениями вместимости транспортного средства. Динамика работы транспортной системы исследуется путем применения многоагентного подхода учета операций и процесса ожидания пассажиров на станциях (остановочных пунктах). Предложенный алгоритм основан на решении общей задачи динамического распределения транспортного потока. Метод является алгоритмом стохастической оптимизации при решении комбинаторных задач. Он связывает стохастический механизм для генерации выполнимых решений и итеративно улучшает качество на основе производительности. Алгоритм основан на минимизации расстояния (кросс-энтропии) до состояния равновесия. Экспериментальное исследование проводилось на небольшой мультимодальной транспортной сети. Как и ожидалось, с ростом коэффициента загрузки увеличивается время прохождения маршрута. Это связано с тем, что по мере повышения уровня загруженности некоторым пользователям может быть предложен более длинный маршрут с целью сокращения общего времени в пути. Поскольку возможные маршруты для перераспределения пассажиров относительно ограничены, процентное увеличение общей экономии времени становится не очень значительным, когда система сильно перегружена. Метод решения динамической задачи оптимальной маршрутизации в большинстве случаев дает реальные результаты. Численное исследование обеспечивает основу сравнения оптимальной маршрутизации системы при различных уровнях перегрузки.

Ключевые слова

моделирование, транспортная сеть, маршрут, кросс-энтропия

Для цитирования

Лебедева О. А. Динамическое моделирование оптимального маршрута в мультимодальной транспортной сети // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 65 № 1. – С. 44–50. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).44-50

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.12.2019, поступила после рецензирования: 22.01.2020, принята к публикации: 07.02.2020

Dynamic modeling of the optimal route in the multimodal transport network

О. А. Lebedeva✉

Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

✉ kravhome@mail.ru

Abstract

The task of optimizing the route transport system has been widely studied for the road network, but less tested for the urban public transport system. The multimodal route networks laid along the shortest path are able to reduce system performance at the time of reaching maximum throughput. The main objective of the study is to develop a dynamic model of the optimal route system for a multimodal transport network. A multimodal transport network is represented by a multilevel oriented graph with many nodes and arcs, which is modeled as a multilevel structure, where each level represents a unimodal subnet and is connected by lines. The network is modeled to simulate passenger movements and operations of transit vehicles. The task of a dynamic system optimization is formulated as the problem of variational inequality for the dynamic equilibrium of a user from the point of view of time-dependent marginal costs. The calculation of the unsteady marginal cost of the journey is

based on the additional waiting time for passengers due to denied boarding on arriving vehicles. Therefore, the path is represented by an acyclic directional route on a multi-level oriented graph connecting a pair of departure-destination points. A transfer is considered because of vehicle capacity limitations. The dynamics of the transport system is studied by applying a multi-agent approach to account for operations and the process of waiting for passengers at stations (stopping points). The proposed algorithm is based on the solution of the general problem of the dynamic distribution of the transport flow. The method is a stochastic optimization algorithm for solving combinatorial problems. It links a stochastic mechanism to generate feasible solutions and iteratively improves quality based on performance. The algorithm relies on minimizing the distance (cross-entropy) to the unknown optimal equilibrium density. An experimental study of the solution of a dynamic problem is carried out on a small multimodal transport network. In most cases, the method for solving the dynamic optimal routing problem gives real results. As expected, with increasing load factor, the travel time of the route increases. This is due to the fact that, as the level of congestion increases, some users may be offered a longer route to reduce the total travel time. Since the possible routes for redistributing passengers are relatively limited, the percentage increase in overall time savings becomes not very significant when the system is heavily overloaded. Numerical research provides a basis for comparing optimal system routing at various congestion levels.

Keywords

modeling, transport network, route, cross-entropy

For citation

Lebedeva O. A. Dinamicheskoye modelirovaniye optimal'nogo marshruta v mul'timodal'noy transportnoy seti [Dynamic modeling of the optimal route in the multimodal transport network]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, Vol. 65, No. 1, pp. 44–50. 10.26731/1813-9108.2020.1(65).44-50

Article info

Received: 16.12.2019, Revised: 22.01.2020, Accepted: 07.02.2020

Введение

В современных исследованиях часто решаются вопросы, связанные с созданием информационной системы, обеспечивающей доступ к ресурсам мультимодальной транспортной сети. Даются рекомендации по выбору мультимодального маршрута, расписания движения, услуг онлайн-бронирования и доставки билетов для повышения эффективности перевозок в системе мультимодального транспорта [1–4].

С ростом уровня селитебной зоны, происходит увеличение спроса, а такая система может сократить время в пути и повысить эффективность мультимодальной транспортной системы [5–8].

Рассмотрим модель динамических мультимодальных транспортных сетей [9–11]. Сеть представлена прямым графом $G(N, A)$ с множеством узлов N и множеством дуг A (рис. 1).

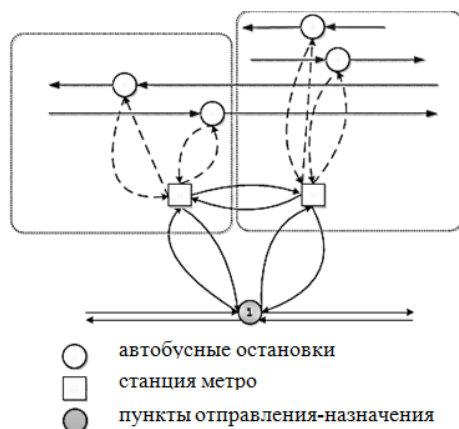


Рис. 1. Структура многоуровневой транспортной сети

Fig. 1. The structure of a multilevel transport network

Мультимодальная сеть моделируется как многоуровневая структура, где каждый уровень представляет юнимодальную подсеть и соединен линиями. Эталонный уровень – это сеть отправления / назначения, где отдельные узлы соединены между собой посредством пешеходных путей, и каждый узел представляет отправителя [12].

В подсетях существует свой график работы, для которого различают стационарные и линейные узлы (остановки) с целью моделирования потоков и движения транспортных средств. Работа узлов станции зависит от расписания и связана дугами с соответствующими узлами. Кроме того, в мультимодальной сети набор узлов используется для соединения путей, и они также соединены линиями метрополитена. Пешеходные и транспортные пути зависят от времени. Оно рассчитывается как длина, поделенная на постоянную скорость подхода к станции (остановочному пункту). Транспортный путь представляет собой набор заранее определенной последовательности объезда узлов для выполнения мультимодальных транспортных операций. Время в пути по дугам рассчитывается по их длине, поделенной на постоянную среднюю скорость движения транспортного средства. Следовательно, мультимодальный путь явно представлен ациклическим направленным вектором на многоуровневом ориентированном графе, соединяющем пару пунктов отправления – назначения. Пересадка рассматривается с учетом ограничений вместимости транспортного средства.

Основная часть

Для моделирования динамики работы транспортной системы применяется многоагентный подход с целью учета операций и процесса ожидания пассажиров на

станциях (остановочных пунктах) [13].

Два типа агентов используются для моделирования движения пассажиров и транспортных средств. В первом типе (транспортные средства) – режим работы предварительно определенных транспортных путей с ограничениями по пропускной способности транспортного средства и запланированной частоте обслуживания. Время остановки на станциях считается постоянным и достаточным для того, чтобы пассажиры могли подняться в вагон или сесть в транспортное средство. Если вместимость транспортного средства иссякла, пассажирам приходится ожидать следующее транспортное средство. Во втором типе (пассажир) – агенты стремятся прибыть в пункт назначения с наименьшими затратами на проезд по ациклическому маршруту в мультимодальной транспортной сети. Как правило в стоимость проезда пассажира по маршруту входят: общее время в пути, время ожидания на остановках, штраф за пересадку, стоимость задержки при раннем (позднем) прибытии в пункт назначения и стоимость проезда. Для простоты последние три условия обобщенной стоимости проезда не учитываются. Следовательно, обобщенная стоимость проезда мультимодального маршрута содержит время подхода к станции, время пересадки между станциями, время посадки (высадки), а также время в пути и время ожидания в узлах (остановочных пунктах). Принимаем принцип «первым пришел – первым вышел» для организации очереди пассажиров на остановках, ожидание $\pi_i^w(t)$ при достижении остановки i в момент времени t можно рассчитать по формуле

$$\pi_i^w = D_i^{-1}(S_i(t)) - \tau, \quad (1)$$

где $S_i(t)$ совокупное поступление в линейный узел i к моменту времени t ; $D_i^{-1}(t)$ – обратная функция совокупного отклонения от линейного узла i к моменту времени t .

Обобщенная стоимость перемещения по маршруту r относительно времени отправления, интервала h и пары k оценивается как

$$C_h(f) = \frac{1}{|M_h|} \sum_{m \in M_h} C_m(f), \quad (2)$$

$$C_h(f) = \frac{1}{|M_h|} \sum_{m \in M_h} [\pi_r^s + \pi_r^v + \pi_r^w(t_m^{dep}, f)], \quad (3)$$

где $C_m(f)$ – время поездки пассажира m ; π_r^s – общее время подхода в пути r ; π_r^v – время прохождения транспортного средства по пути r ; $\pi_r^w(t_m^{dep}, f)$ рассчитывается как сумма времени ожидания на линейных узлах пути r . Время ожидания на остановочных пунктах зависит от интервалов движения, вместимости транспортных средств и предполагаемого процесса ожидания.

Предложенный алгоритм основан на решении общей задачи динамического распределения транспортного потока. Метод включает использование алгоритма стохастической оптимизации для решения комбинаторных задач. Он связывает стохастический механизм для генерации выполнимых решений и

итеративно улучшает качество на основе производительности. Алгоритм основан на минимизации расстояния (кросс-энтропии) до неизвестной оптимальной плотности равновесия [13].

Сформулируем основную концепцию алгоритма решения задачи. Для этого рассмотрим пути с парой пунктов отправления – назначения, соединенных набором маршрутов R_k с функциями вероятности p^w и с индексом итерации w для генерации решений.

Определим функцию производительности пути по распределению Больцмана:

$$H_r(\gamma) = e^{-C_r(f)/\gamma} \quad (4)$$

где γ – контрольный параметр, при уменьшении которого увеличиваются потоки на более экономически выгодных маршрутах.

Для получения целевой плотности вероятности p^* прямой путь генерируют с помощью грубого моделирования Монте-Карло, в результате получается очень большая выборка, понятно, что это нецелесообразно. Альтернативным способом является использование плотности выборки $p^w \{p(f; v)\}$, параметризованное некоторой информацией о производительности v . Цель состоит в том, чтобы получить экономически выгодный маршрут с итеративным решением на основе производительности пути.

Вероятность выбора пути с наименьшей стоимостью будет скорректирована для обработки больших потоков на следующей итерации. Чтобы вывести оптимальную плотность выборки из известной вероятности p^w , где w – индекс итерации, для решения задачи минимизации кросс-энтропии, эквивалентный следующей задаче максимизации, нужно (5):

$$\max E_{p^w} [H(\gamma) \ln p], \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R_k} p_r = 1, \forall p_r \geq 0, \quad (6)$$

где w – индекс итерации; p^w – текущая плотность; p – плотность выборки, которая должна быть получена.

Функция Лагранжа (5)–(6) записывается в виде

$$L = \sum_{r \in R_k} [p_r^w e^{-C_r/\gamma} \ln p] + u [\sum_{r \in R_k} p_r - 1] \quad (7)$$

где u – множитель Лагранжа.

Условие оптимальности первого порядка:

$$\frac{\partial L}{\partial p_r} = \frac{p_r^w e^{-C_r/\gamma}}{p_r} + u = 0. \quad (8)$$

Суммируя по p_r для $r \in R_k$, получаем:

$$\sum_{r \in R_k} \frac{p_r^w e^{-C_r/\gamma}}{-u} = 1, \quad (9)$$

$$\sum_{r \in R_k} \frac{p_r^w e^{-C_r/\gamma}}{-u} = -u = \frac{p_r^w e^{-C_r/\gamma}}{p_r}. \quad (10)$$

Следовательно, плотность выборки p_r для итерации $w + 1$ рассчитывается как

$$p_r^{w+1} = p_r^w \frac{e^{-C_r^w/\gamma^w}}{\sum_{s \in R_k} p_s^w e^{-C_s^w/\gamma^w}}, \quad \forall r \in R_k. \quad (11)$$

Эта скорректированная функция вероятности (плотность выборки) определяет смещение потоков на более коротких расстояниях. Смещение определяется параметром γ^w , минимизированным при условии, что суммирование изменений вероятностей

ограничено расходящимся рядом, т. е.

$$\text{Min } \gamma^w \text{ то } \sum_{r \in R_k} |p_r^{w+1} - p_r^w| \leq a^w \quad (12)$$

где $a^w = \frac{Q}{w}$ – числовой расходящийся ряд ($a^w \rightarrow 0$ при $w \rightarrow \infty$ и $\sum_{w=1}^{\infty} a^w = \infty$), так что регулировка потока сходится к фиксированным точкам; θ – положительная постоянная.

Поскольку процесс итеративного обновления вероятности (11)–(12) приводит к $\gamma_w \rightarrow \infty$, то поле сходится к неподвижным точкам.

Основной алгоритм решения задачи состоит из следующих шагов [13, 14]:

1. Инициализация – генерация выбора ациклического мультимодального пути, установленная модифицированным алгоритмом k-кратчайшего (9)–(10) или подходом стохастической генерации маршрута (11). Инициализировать равномерное распределение вероятностей для выбора пути.

2. Динамическая загрузка сети – загрузка, зависящая от спроса во времени в мультимодальной транспортной сети, и запуск симуляции. Когда пассажиры прибывают в соответствующий пункт назначения, рассчитывается общая стоимость поездки. Вычислить предельные издержки пути, зависящие от времени, в отношении интервала отправления. При заданном интервале h время отправления выбирается случайным образом в пределах $(t_0 + h\Delta, t_0 + (h + 1)\Delta)$, где t_0 – самое раннее время отправления.

3. Обновление вероятности назначения – вычисление вероятности нестационарного назначения пути:

$$p_h^{w+1} = p_h^w \frac{e^{-\bar{\Gamma}_h^w / \gamma_h^w}}{\sum_{s \in R_h} p_h^s e^{-\bar{\Gamma}_h^s / \gamma_h^s}}, \forall r \in R_h, \quad (13)$$

где $\bar{\Gamma}_h^w = \frac{1}{|R_h|} \sum_{r \in R_h} \bar{\Gamma}_h^r$ является нормированной предельной стоимостью пути относительно h и k ; $\bar{\Gamma}_h^w$ – предельная стоимость пути (средняя предельная стоимость пути $\bar{\Gamma}_h^w$ рассчитывается как $\bar{\Gamma}_h^w = \frac{1}{|R_h|} \sum_{r \in R_h} \Gamma_h^r$); R_{hk} – это набор вариантов выбора пути, сгенерированный на шаге 1; γ_h^w – контрольный параметр относительно h и k , полученный в результате (12).

4. Критерии остановки. Когда $w = w^{max}$ или результирующие обновления вероятности стабилизируются, происходит остановка, в противном случае переходим к шагу 2.

Экспериментальное исследование проводится на небольшой мультимодальной транспортной сети (рис. 2, 3).

Сеть состоит из одной автомобильной дороги и двух линий метро, соединяющих четыре пары наружных диаметров. Для упрощения, учитываем транспортные операции только в одном направлении. Возможно расширить транспортную сеть и связанные с ней операции в обоих направлениях с небольшими затратами. Всего в многоуровневой мультимодальной сети имеется 19 узлов.

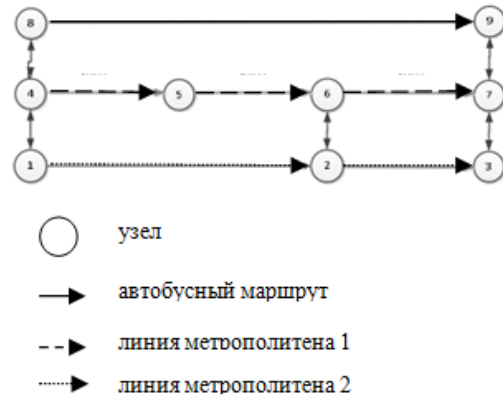


Рис. 2. Транспортная сеть с одной улицей и двумя линиями метрополитена
 Fig. 2. Transport network with one street and two metro lines

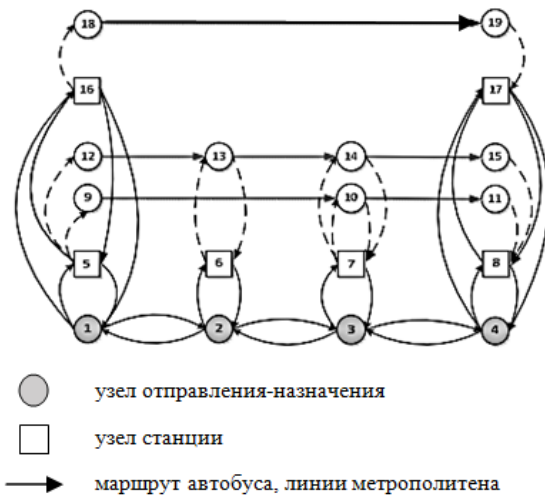


Рис. 3. Многоуровневая мультимодальная транспортная сеть
 Fig. 3. Multilevel multimodal transport network

Скорость метрополитена 20 м/с, автобуса – 12,5 м/с. Вместимость транспортного средства для метрополитена и автобуса установлена как 200 и 40 пассажиров на транспортное средство соответственно, время остановки – 20 с, частота – 20 и 6 транспортных средств в час. Длина дуг посадки и высадки устанавливается равной 100 м. Расстояние доступа между узлами и станциями метро / автобуса 300 м. Период времени отправления 60 мин. с дискретным интервалом времени 5 мин. Существуют три пункта отправления (узел 1, 2 и 3) и один пункт назначения (узел 4). Для каждой пары спрос, зависящий от времени эталонный вариант устанавливается равным 160 пассажирам / 20 мин., 320 пассажирам / 20 мин. при создании перегруженности. В численном исследовании проверены четыре фактора нагрузки по

отношению к эталонному варианту, а именно 1,0, 1,5, 2 и 2,5 (табл.). Многоагентная транспортная система реализована методом дискретного моделирования событий.

Для пары (1, 4) возможно 5 вариантов пути:

1. 1–16–18–19–17–4 (23 мин.);
2. 1–5–12–13–14–15–8–4 (27 мин.);
3. 1–5–9–10–11–8–4 (23 мин.);
4. 1–5–12–13–14–7–10–11–8–4 (32 мин.);
5. 1–5–9–10–7–14–15–8–4 (26 мин.).

Время прохождения пути включает в себя среднее время ожидания транспортного средства. Результаты расчетов алгоритма приведены (табл.).

Таблица. Результаты апробирования метода
Table. Method testing results

Фактор нагрузки	Число пассажиров	Время поездки (ч)
1	1 950	670
1,5	2 900	980
2	3 900	1 320
2,5	4 580	1 680

Как и ожидалось, с ростом коэффициента загрузки, время прохождения маршрута увеличивается. Это связано с тем, что по мере повышения уровня загруженности некоторым пользователям может быть предложен более длинный маршрут, с целью сокращения общего времени в пути. Поскольку возможные маршруты перераспределения пассажиров относительно ограничены, процентное увеличение общей экономии времени становится не очень значительным, когда система сильно перегружена. Однако возможно ожидать, что когда для каждого пункта назначения будет использоваться больше маршрутов, процент общей экономии времени может стать более значительным [13, 15–21].

Если при расчете обобщенной стоимости учитывается запланированная стоимость задержки

раннего (позднего) прибытия в пункт назначения, можно ожидать более существенной разницы. Метод решения динамической задачи оптимальной маршрутизации в большинстве случаев дает реальные результаты.

Заключение

Проектирование мультимодальных систем выбора маршрута направлено на предоставление пассажирам эффективного руководства по прибытию в пункт назначения с наименьшими затратами. С системной точки зрения желательно сократить общее время в пути, однако традиционная зависящая от времени система управления маршрутом на основе кратчайшего пути может быть неэффективной из-за ограничений пропускной способности. В этой статье рассматривается вариант моделирования многоуровневым ориентированным графом для имитации движений пассажиров и транспортных средств и транспортных операций. Оптимальная задача динамической системы сформулирована как проблема вариационного неравенства динамического равновесия с точки зрения зависимых от времени предельных издержек. Расчет нестационарных предельных издержек пути основан на дополнительном времени ожидания пассажиров из-за отказа в посадке на прибывающие транспортные средства. Предложен для решения оптимизации работы динамической транспортной системы метод кросс-энтропии. Результаты расчетов динамических случаев показывают, что предлагаемый алгоритм работает на реальной транспортной сети. Проведен анализ стратегии маршрутизации с учетом различных коэффициентов загрузки сети. Численный результат небольшой сети показывает, что при увеличении уровня перегрузки транспортной системы можно сократить общее время в пути.

Исследование включает в себя некоторые численные эксперименты на реалистичных мультимодальных транспортных сетях и ограничениях.

Список литературы

1. Лебедева О.А. Показатели оценки эффективности работы общественного транспорта. Современные технологии и научно-технический прогресс. 2018. Т. 1. С. 108–109.
2. Лебедева О.А. Основные принципы развития транспортных систем городов / О.А. Лебедева, Д.В. Антонов / Вестник Ангарской государственной технической академии. – Ангарск: Изд-во АГТА, 2014. – С. 149–155.
3. Гозбенко В.Е., Иванков А.Н., Колесник М.Н., Пашкова А.С. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажиро- и грузопотоков. Депонированная рукопись № 330-B2008 17.04.2008.
4. Гозбенко В.Е., Крипак М.Н., Иванков А.Н. Совершенствование транспортно-экспедиционного обслуживания грузовладельцев. Иркутск, 2011.
5. Крипак М.Н., Гозбенко В.Е., Колесник А.И. Оптимизация структуры транспорта как мера повышения эффективности функционирования системы городского пассажирского транспорта // сб. науч. тр. АНГТУ. Ангарск: Изд-во АНГТУ, 2013. С. 229–232.
6. Полтавская Ю.О., Михайлов А.Ю. Сегмент городской улицы при оценке качества функционирования городского общественного пассажирского транспорта // Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки. Материалы 8 молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Научноиздательский центр «Открытие», 2015. – С. 40–44.
7. Михайлов А.Ю., Шаров М.И. К вопросу развития современной системы критериев оценки качества функционирования общественного пассажирского транспорта // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. 2014. Т. 9. № 19 (146). С. 64–66.

8. Шаров М.И., Михайлов А.Ю., Ковалева Т.С. Оценка надежности работы городского пассажирского транспорта в Иркутске // Вестник ИрГТУ. 2012. Т. 68. № 9. С. 174–178.
9. Weymann J., J.L. Farges, J.J. Henry. Optimization of traffic dynamic route guidance with drivers' reactions in a queue-based model. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 25, No. 7, 1995, pp. 1161–1165.
10. Jahn O., Möhring R., Schulz A., Moses N. S. System-Optimal Routing of Traffic Flows with User Constraints in Networks with Congestion. *Operations research*. Vol. 53, No. 4. 2005, pp. 600–616.
11. Bottom J.A. 2000. Consistent anticipatory route guidance. Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
12. Chow, A. H. F. Properties of system optimal traffic assignment with departure time choice and its solution method. *Transportation Research Part B*, Vol. 43, 2009, pp. 325–344.
13. Ma T.-Y., J.P. Lebacque. A cross entropy based multi-agent approach to traffic assignment problems. In: Appert-Rolland C., Chevoir F., Gondret P. Lassarre S., Lebacque J.P., Schreckenberg M. (Eds.), *Proceedings of the Traffic and Granular Flow '07*, Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 161–170.
14. Powell W.B., Y. Sheffi. The Convergence of Equilibrium Algorithms with Predetermined Step Sizes. *Transportation Science*, Vol. 16, 1982, pp. 45–55.
15. Beckmann M., McGuire C.B., Winsten C.B. *Studies in the economics of transportation*. 1955: Yale University Press, New Haven, Connecticut; also published as Rand-RM-1488-PR, Rand Corporation, Santa Monica.
16. Peeta S., Mahmassani H. System optimal and user equilibrium time-dependent traffic assignment in congested networks. *Annals of Operations Research*, Vol. 60. No. 1. 1995. pp. 80–113.
17. Tong C.O., Wong S.C. A predictive dynamic traffic assignment model in congested capacity-constrained road networks. *Transportation Research Part B*, Vol. 34, No. 8, 2000, pp. 625–644.
18. Lebacque J.-P., Ma T.-Y., Khoshyaran M.M. The cross-entropy field for multimodal dynamic assignment. In: *Proceedings of the Traffic and Granular Flow '09*, 2009, Springer (to appear).
19. Helvik B.E., Wittner O. Using the Cross-Entropy Method to Guide / Govern Mobile Agent's Path Finding. *Networks. Lecture Notes in Computer Science*, 2001. Vol. 2164. 2001. pp. 255–268.
20. Bliemer M., Taale H. Route generation and dynamic traffic assignment for large networks. In: *Proceedings of the first International Symposium on Dynamic Traffic Assignment*, 2006, Leeds, UK.
21. Lebedeva O.A., Kripak M., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*, 36, 427–433.

References

1. Lebedeva O.A. Pokazateli otsenki effektivnosti raboty obshchestvennogo transporta [Performance indicators for public transport]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress [Modern technologies and scientific and technological progress]*, 2018, Vol. 1, pp. 108–109.
2. Lebedeva O.A., Antonov D.V. Osnovnye printsipy razvitiya transportnykh sistem gorodov [The basic principles of the development of transport systems of cities]. *Vestnik Angarskoi gosudarstvennoi tekhnicheskoi akademii [The Bulletin of the Angarsk State Technical Academy]*, Angarsk: AGTA Publ., 2014, pp. 149–155.
3. 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 of forecasting and optimizing the transport network, taking into account the capacity of passenger and cargo flows. The deposited manuscript No. 330-V2008 04.17.2008].
4. Gozbenko V.E., Kripak M.N., Ivankov A.N. Sovershenstvovanie transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev [Improving freight forwarding services for cargo owners]. Irkutsk, 2011.
5. Kripak M.N., Gozbenko V.E., Kolesnik A.I. Optimizatsiya struktury transporta kak mera povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta [Optimization of the transport structure as a measure of increasing the efficiency of the functioning of the urban passenger transport system]. *Sb. nauch. tr. AnGTU [Proc. of AnSTU]*. Angarsk: AnGTU Publ., 2013, pp. 229–232.
6. Poltavskaya Yu.O., Mikhailov A.Yu. Segment gorodskoi ulitsy pri otsenke kachestva funktsionirovaniya gorodskogo obshchestvennogo passazhirskogo transporta [A segment of a city street in assessing the quality of functioning of urban public passenger transport]. *Shag v budushchee: teoreticheskie i prikladnye issledovaniya sovremennoi nauki. Materialy 8 molodezhnoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh [Step into the future: theoretical and applied research of modern science. Materials of the 8th youth international scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists]*. Otkrytie Scientific Publishing Centre, 2015, pp. 40–44.
7. Mikhailov A.Yu., Sharov M.I. K voprosu razvitiya sovremennoi sistemy kriteriev otsenki kachestva funktsionirovaniya obshchestvennogo passazhirskogo transporta [On the development of a modern system of criteria for assessing the quality of functioning of public passenger transport]. *Izv. Volgograd. gos. tekhn. un-ta [News of Volgograd State Tech. Un-ty]*, 2014, Vol. 9, No. 19 (146), pp. 64–66.
8. Sharov M.I., Mikhailov A.Yu., Kovaleva T.S. Otsenka nadezhnosti raboty gorodskogo passazhirskogo transporta v Irkutске [Assessment of the reliability of urban passenger transport in Irkutsk]. *Vestnik IrGTU [The Bulletin of Irkutsk State Technical University]*, 2012, Vol. 68, No. 9, pp. 174–178.
9. Weymann J., Farges J.L., Henry J.J. Optimization of traffic dynamic route guidance with drivers' reactions in a queue-based model. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 25, No. 7, 1995, pp. 1161–1165.

10. Jahn O., Möhring R., Schulz A., Moses N. S. System-Optimal Routing of Traffic Flows with User Constraints in Networks with Congestion. *Operations research*, Vol. 53, No. 4, 2005, pp. 600–616.
11. Bottom J.A. Consistent anticipatory route guidance. Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2000.
12. Chow A. H. F. Properties of system optimal traffic assignment with departure time choice and its solution method. *Transportation Research Part B*, Vol. 43, 2009, pp. 325–344.
13. Ma T.-Y., Lebacque J.P. A cross entropy based multi-agent approach to traffic assignment problems. In: Appert-Rolland C., Chevoir F., Gondret P. Lassarre S., Lebacque J.P., Schreckenberg M. (Eds.), *Proceedings of the Traffic and Granular Flow '07*, Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 161–170.
14. Powell W.B., Sheffi Y. The Convergence of Equilibrium Algorithms with Predetermined Step Sizes. *Transportation Science*, Vol. 16, 1982, pp. 45–55.
15. Beckmann M., McGuire C.B., Winsten C.B. *Studies in the economics of transportation*. 1955: Yale University Press, New Haven, Connecticut; also published as Rand-RM-1488-PR, Rand Corporation, Santa Monica.
16. Peeta S., Mahmassani H. System optimal and user equilibrium time-dependent traffic assignment in congested networks. *Annals of Operations Research*, Vol. 60, No. 1, 1995, pp. 80–113.
17. Tong C.O., Wong S.C. A predictive dynamic traffic assignment model in congested capacity-constrained road networks. *Transportation Research Part B*, Vol. 34, No. 8, 2000, pp. 625–644.
18. Lebacque J.-P., Ma T.-Y., Khoshyaran M.M. The cross-entropy field for multimodal dynamic assignment. In: *Proceedings of the Traffic and Granular Flow '09*, 2009, Springer (to appear).
19. Helvik B.E., Wittner O. Using the Cross-Entropy Method to Guide. Govern Mobile Agent's Path Finding. Networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 2001, Vol. 2164, 2001, pp. 255–268.
20. Bliemer M., Taale H. Route generation and dynamic traffic assignment for large networks. In: *Proceedings of the first International Symposium on Dynamic Traffic Assignment*, 2006, Leeds, UK.
21. Lebedeva O.A., Kripak M., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network through by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*, 36, 427–433.

Информация об авторах

Лебедева Ольга Анатольевна – к. т. н., 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 10.26731/1813-9108.2020.1(65).50-59

УДК 656.2;656.222.6

Оптимизация системы технической эксплуатации грузового вагонного состава при организации интенсивных сквозных маршрутных перевозок

В. В. Кашковский✉, **И. И. Тихий**, **А. Аргалант**, **Р. Р. Аскарров**, **И. Баатар**

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ kww542339@km.ru

Резюме

Управление эксплуатационной работой железных дорог осуществляется в целях обеспечения производственной деятельности железнодорожного транспорта и связано с организацией перевозочного процесса. Важной составляющей процесса грузовых перевозок является система технической эксплуатации грузового вагонного состава. В работе рассмотрена система технической эксплуатации грузового вагонного состава при организации интенсивных сквозных маршрутных перевозок по магистрали. Очевидно, что оптимизация подобной системы является важной и актуальной народно-хозяйственной задачей. Методология ее решения базируется на системном подходе. Результат работы основан на широком исследовании моделей систем технической эксплуатации методом статистического моделирования. В качестве исходных данных для моделирования системы эксплуатации использовалась статистика по 2 398 отказам грузовых вагонов с последним деповским ремонтом, полученная в ВЧД-8 Восточно-Сибирской железной дороги – филиале ОАО «РЖД». Для данного вида вагонов применяется комбинированный норматив периодичности проведения деповского ремонта грузовых вагонов согласно Положению о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении, принятого по распоряжению ОАО «РЖД» № 2759р от 29 декабря 2012 г. Фактический пробег вагонов между деповскими ремонтами составляет примерно 160 тыс. км. Главным научно-теоретическим результатом представленной работы является количественная оценка суммарного среднесуточного отхода вагонов в отцепочный ремонт ТР-2 при маршрутных перевозках проектируемой железнодорожной магистрали и при условии эксплуатации вагонов по комбинированному критерию. Это очень важный