

Интеллектуальные системы

УДК 656.1:658.012.011.56

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВЛЕНИЯ МАРШРУТОВ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА ПРИ СОЗДАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Е.А. Кочегурова, Ю.А. Мартынова

Томский политехнический университет
E-mail: martynova.ya@gmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации маршрутных схем городского пассажирского транспорта в условиях динамичного социально-экономического развития городов. Рассмотрена система городского пассажирского транспорта, представляющая собой совокупность взаимовлияющих подсистем: «город», «транспорт», «пассажиры». Определены показатели эффективности функционирования городского пассажирского транспорта для всех участников системы. В общем виде приведены целевые функции задачи оптимизации системы городского пассажирского транспорта. Описана задача маршрутизации транспорта, приведена ее классическая формулировка и известные разновидности этой задачи. Рассмотрены известные методы решения транспортных задач: эвристические (классические) и метаэвристические методы. Определен критерий оптимизации маршрутных схем городского пассажирского транспорта, учитывающий взаимодействие интересов всех участников системы. В качестве такого критерия оптимизации для системы городского пассажирского транспорта предложена плотность пассажиропотока на исследуемом участке дороги. Определена формулировка задачи оптимизации системы городского пассажирского транспорта.

Ключевые слова:

Система городского пассажирского транспорта, показатели эффективности, задача коммивояжера, задача маршрутизации транспорта, оптимизация.

Пассажирский транспорт относится к числу важнейших отраслей жизнеобеспечения города, от функционирования которых зависят качество жизни населения, эффективность работы отраслей экономики города и возможность использования ее градостроительного и социально-экономического потенциала.

За последние годы во многих городах России значительно изменилась структура спроса на пассажирские перевозки. Это обусловлено процессом динамичного социально-экономического развития городов, который вызвал появление новых объектов и зон притяжения пассажиропотоков, таких как деловые, торговые, развлекательные и спортивные центры, изменения в структуре расселения жителей города в связи с появлением новых зон активной жилой застройки.

Одновременно с ростом уровня автомобилизации населения возросла нагрузка на дороги, одну из существенных частей которой составляет пассажирский транспорт.

Все это предопределяет необходимость оптимизации стихийно сложившейся системы городского пассажирского транспорта (ГПТ), не отвечающей

потребностям сегодняшнего дня. Эффективным решением данной проблемы является применение систем поддержки принятия решений в области маршрутизации транспорта [1]. Однако автоматизация задач данной отрасли требует проведения научных исследований с целью получения эффективных алгоритмов, пригодных для использования на практике.

Согласно [2. С. 6–11], в упрощенном виде система ГПТ представляется в виде трех взаимовлияющих подсистем: «город», «транспорт», «пассажиры» (рис. 1).



Рис. 1. Система городского пассажирского транспорта

Подсистема «город» включает в себя такие элементы, как «промышленность», «жилая застройка», «улично-дорожная сеть», а также обслуживание и управление этими элементами. Основным требованием подсистемы «город» к работе ГПТ яв-

ляется обеспечение бесперебойной перевозки городского населения.

Подсистема «транспорт» включает организационные, обеспечивающие пассажирские перевозки.

Для подсистемы «пассажиры» эффективность функционирования транспортной системы определяется качеством удовлетворения спроса на перевозку.

Таким образом, видно, что интересы участников системы ГПТ значительно отличаются друг от друга. В советское время транспортная система подчинялась административному управлению, поэтому оптимизация ГПТ осуществлялась посредством государственного регулирования. Определялись нормативы по некоторым показателям, и ставилась задача сокращения транспортных расходов [3]. В последнее время на рынке ГПТ появились частные перевозчики. Поэтому задача оптимизации ГПТ в условиях конкуренции усложнилась.

Взаимодействия участников ГПТ весьма многообразны и в самом общем виде приведены на рис. 2. Вопросы взаимодействия подсистем «администрация» и «пассажиры» здесь не рассматриваются.

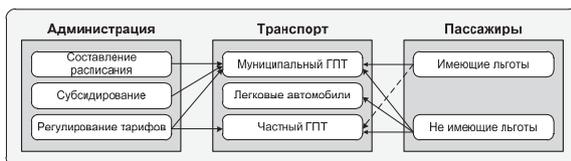


Рис. 2. Схема взаимодействия участников ГПТ

Функционирование системы ГПТ непосредственно связано с его эффективностью. Для ГПТ эффективность полностью определяется потребностями его участников, которые должны быть учтены еще на этапе анализа [4].

С точки зрения городской администрации, показателями эффективности могут быть:

- удовлетворение спроса населения на перевозки;
- экономическая эффективность муниципальных транспортных организаций (максимизация их прибыли);
- эффективность организации дорожного движения;
- отсутствие столкновений интересов муниципальных и частных транспортных операторов, выливающих в конфликты.

С точки зрения транспортных организаций, в качестве основного показателя эффективности выступает максимизация экономической прибыли от перевозок.

С точки зрения пассажиров, конечных потребителей транспортных услуг, показателями эффективности могут быть:

- минимизация времени перемещения;
- минимизация стоимости поездки (с учетом возможных пересадок);
- улучшение комфортабельности поездки (за счет типа транспортного средства и уровня его наполнения).

Определение единого критерия эффективности для пассажиров существенно затруднено различной мотивацией при принятии решения о перемещении и его способе, т. е. понятие оптимальности конкретного пассажира значительно отличается от критерия оптимальности населения в целом.

В качестве интегральных показателей эффективности системы ГПТ для населения могут быть определены следующие критерии:

- минимальное суммарное времени ожидания всех пассажиров, которые с некоторой вероятностью направляются от исходных пунктов отправления в пункт назначения;
- минимальное время в пути от любого исходного пункта отправления в любой пункт назначения;
- минимальное количество пересадок при перемещении от любого исходного пункта отправления в необходимый пункт назначения и т. п.

Очевидно, что показатели эффективности с точки зрения участников системы ГПТ являются противоречивыми. Так, например, сокращение времени ожидания пассажиров очевидным образом связано с увеличением количества подвижного состава на маршруте, а следовательно, со снижением его загруженности и экономической выгоды. С другой стороны, стремление увеличить прибыльность транспортными организациями может привести к отказу населения от перевозок и появлению конкурирующих организаций. Таким образом, оценка показателей эффективности должна проводиться с учетом потребностей всех участников системы ГПТ.

На сегодняшний день известно большое количество работ, посвященных оптимизации маршрутов ГПТ. В работах [5–9] авторы предлагают в качестве критерия оптимизации маршрутных схем ГПТ использовать общее время, затраченное пассажирами на поездку, работы [10–12] направлены на сокращение количества пересадок и уменьшение непрямолинейности маршрута. Авторы более поздних работ [13–15] стремятся учитывать затраты транспортных организаций на перевозки и стоимость оценки потерь времени пассажиров на перемещение. Анализ всех этих работ доказывает, что построение оптимальной маршрутной схемы ГПТ необходимо осуществлять с учетом интересов нескольких участников транспортной системы (например, транспортных организаций и пассажиров).

Переходя к формальному описанию задачи оптимизации системы ГПТ, можно выделить несколько основных критериев эффективности, в общем виде представленных в виде целевых функций:

$$\begin{cases} T_{\Pi} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \rightarrow \min; \\ C_{\Pi} = \sum_{Q_{\Pi}} Q_{\Pi} \cdot T \rightarrow \min; \\ \Pi_{\Gamma O} = Q_{\Pi} \cdot T - Z_3 \rightarrow \max, \end{cases}$$

где T_{Π} – время, затраченное пассажирами на передвижение; T_1 – время, затраченное на подход к остановочному пункту; T_2 – время ожидания транспортного средства; T_3 – время поездки; T_4 – время, затраченное на передвижение до места назначения; Q_{Π} – количество пассажиров; C_{Π} – стоимость поездки с учетом возможных пересадок; $Q_{\Pi\Pi}$ – количество поездок/пересадок в день; T – тариф на перевозку пассажиров; $\Pi_{\text{То}}$ – прибыль транспортных организаций; Z_3 – эксплуатационные затраты транспортных организаций.

Формальное описание системы ГПТ применяется в системах поддержки принятия решений в области транспортной маршрутизации: проектирование маршрутной сети населенного пункта, определение типа и количества подвижного состава на маршрутах, оптимизация существующих маршрутных схем и т. д. При этом вопросы оптимизации должны быть рассмотрены с позиций всех участников системы пассажирских перевозок. Их интересы зачастую противоречивы (рис. 3), но оптимизация системы ГПТ должна учесть и сбалансировать потребности всех участников ГПТ.

Одной из основных задач таких систем является создание автоматизированных приложений для расчета и построения эффективных маршрутов городского транспорта, особенно в условиях постоянной модернизации ГПТ. Классическая формулировка этой задачи широко известна как задача транспортной маршрутизации.

В общем виде задача транспортной маршрутизации (Vehicle Routing Problems, VRP) представляет собой задачу комбинаторной оптимизации, в которой для определенного набора транспортных средств, расположенных в одном или разных частях населенного пункта, должен быть определен набор маршрутов до нескольких отдаленных пунктов прибытия. Эта задача является задачей целочисленного программирования, относящейся к классу NP-трудных задач. Алгоритмы комбинаторной оптимизации применяются при решении

NP-трудных задач, позволяя сокращать количество допустимых решений с помощью эффективной процедуры поиска.

Задача маршрутизации транспорта является развитием хорошо изученной задачи коммивояжера (Traveling Salesman Problem, TSP). Задача коммивояжера заключается в нахождении самого оптимального маршрута, который проходит через все указанные города хотя бы по одному разу с последующим возвращением в исходный город. В условиях задачи задаются критерий оптимальности маршрута (кратчайший, дешёвый и т. п.) и соответствующие матрицы расстояний, стоимости и т. п.

Несмотря на то, что эти задачи являются родственными, они отличаются и терминологически, и математическим описанием. Термин «коммивояжер» (travelling salesman) заменен в задаче маршрутизации на «транспортное средство» (vehicle), «город» (town) – на «клиент» (customer), «путь» (tour) – на «маршрут» (route). Кроме того, в задаче маршрутизации транспорта добавлен еще один дополнительный термин – «депо» (depot). Под депо в данной задаче подразумеваются узлы, где начинаются и заканчиваются маршруты всех транспортных средств.

Классическая формулировка задачи транспортной маршрутизации выглядит следующим образом [16]:

1. Задается $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ – множество всех вершин, где v_0 – вершина, в которой маршрут должен начинаться и заканчиваться («вершина-депо»).
2. $V^*=V\setminus\{v_0\}$ – множество из n вершин, необходимых для посещения.
3. Задается C -матрица стоимостей перемещения между вершинами; c_{ij} – стоимость проезда между вершинами v_i и v_j .
4. Необходимо построить m маршрутов минимальной суммарной стоимости, начинающиеся и заканчивающиеся в депо v_0 , при этом каждая

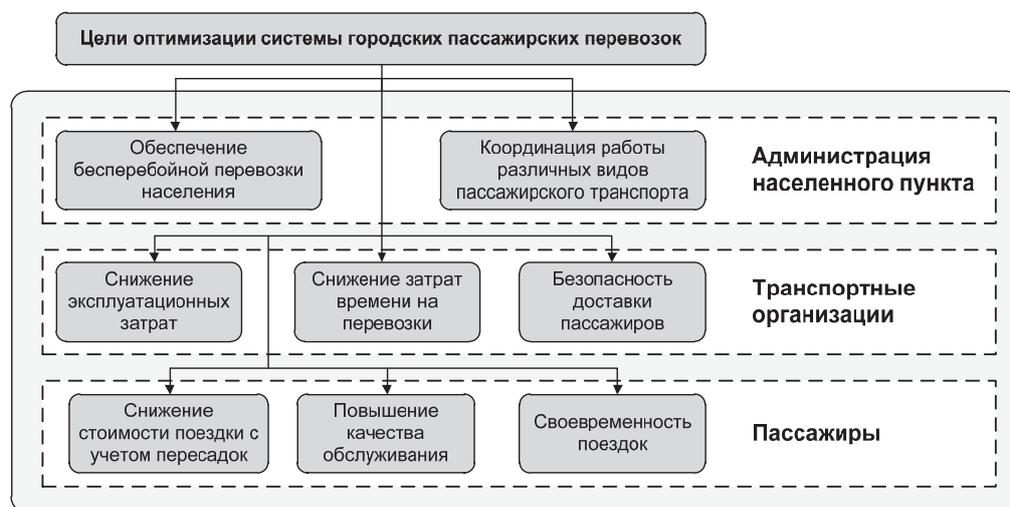


Рис. 3. Цели оптимизации системы ГПТ

вершина V^* должна быть включена в маршрут только одного транспортного средства.

Классический вариант задачи маршрутизации транспортных средств не всегда охватывает все особенности практических задач построения маршрутов, специфика и формулировка которых приведена в табл. 1.

Таблица 1. Разновидности задачи маршрутизации транспорта

Задача	Формулировка
Задача маршрутизации транспорта с учетом грузоподъемности транспортного средства	Задается величина $q > 0$ – грузоподъемность каждого транспортного средства, и множество $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, где q_i определяет объем груза в каждой вершине v_i
Задача маршрутизации транспорта с ограничением количества узлов в маршрутах	Задается величина $d > 0$ – максимальное количество вершин, необходимых для посещения, в каждом маршруте
Задача маршрутизации транспорта для нескольких депо	Маршрут может начинаться в любом из возможных депо, но заканчиваться обязательно в том, где начался. Определяется множество $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ вершин-депо
Задача маршрутизации транспорта с разделенной доставкой	Допускается посещение узлов маршрута не одним, а несколькими транспортными средствами
Стохастическая задача маршрутизации транспорта	Некоторые параметры задачи (количество и запросы клиентов и т. д.) могут иметь случайный характер, заданный вероятностными величинами
Задача маршрутизации транспорта с обратным грузом	Транспортные средства должны не только доставлять груз к клиентам, но и обратно
Задача маршрутизации транспорта с окнами времени	Для каждой вершины маршрута определяется некоторый интервал времени для принятия транспортного средства

В настоящее время известно достаточно много методов решения задачи маршрутизации транспорта. Как говорилось ранее, задача маршрутизации транспорта является обобщением известной задачи коммивояжера, в которой необходимо построить сразу несколько замкнутых маршрутов, проходящих через некоторую общую вершину (депо). Эти задачи относятся к классу задач комбинаторной оптимизации и являются NP-трудными. Методов нахождения их точных решений и проверки приближенных на оптимальность за конечное время не существует. Существует точный алгоритм для решения задачи маршрутизации транспорта на основе метода ветвей и границ, но в силу быстрого роста времени вычислений его невозможно применять для задач с более чем 25–30 вершинами.

В последнее время наибольший интерес проявляется к приближенным алгоритмам (табл. 2). В начале 60-х гг. XX в. активное развитие получили эвристические методы, в наши дни называемые классическими. В последние двадцать лет основные усилия были направлены на развитие так называемых метаэвристических методов. Эти методы не

являются законченными эвристиками, готовыми для практического применения, они представляют собой некоторый метод для построения законченной эвристики для конкретной задачи. Большинство этих методов основаны на наблюдениях за живой и неживой природой. Их отличительная особенность заключается в способности преодоления точки локального оптимума для продолжения поиска, поэтому потенциально в сравнении с классическими эвристиками метаэвристические методы способны находить более качественные решения.

Таблица 2. Приближенные методы решения задачи маршрутизации транспорта

Тип метода	Классификация методов	Используемые алгоритмы
Эвристические (классические) методы	Конструктивные методы	<ul style="list-style-type: none"> Алгоритм Кларка-Райта (Clarke and Wright); Последовательный алгоритм вставки Моля-Джеймсона (Mole and Jameson); Последовательный алгоритм вставки Кристофидеса-Мингоzzi-Тосса (Christofides, Mingozi and Toth)
	Двухфазные методы	<ul style="list-style-type: none"> Алгоритм заметания (sweep algorithm); Алгоритм Фишера-Джекумера (Fisher and Jaikumar); Алгоритм Брамела-Симчи-Леви (Bramel-Simchi-Levi); Алгоритм лепестков
	Улучшающие методы	<ul style="list-style-type: none"> Оптимизация отдельных маршрутов; Улучшение нескольких маршрутов
Метаэвристические методы	Поиск с исключениями (Taboo search)	<ul style="list-style-type: none"> Алгоритм Османа (Osman); Алгоритм Генро-Герца-Лапорте (Taburoute); Алгоритм Тейлорда (Taillard); Алгоритм Ксю-Келли (Xu and Kelly); Алгоритм Риго-Рокарола (Rigo and Roucairol)
	Моделируемый отжиг (Simulated Annealing)	–
	Детерминированный отжиг (Deterministic Annealing)	<ul style="list-style-type: none"> Пороговое принятие (Threshold accepting); Ход от рекорда к рекорду (Record to record travel)
	Генетический алгоритм (Genetic algorithm)	–
	Алгоритм на основе муравьиных колоний (Ant Systems)	–
	Нейронные сети (Neural Network)	–

Рассмотренные подходы обычно ориентируются на классическую формулировку задачи маршрутизации транспорта, в которой рассматривается симметричная матрица расстояний, количество транспортных средств жестко не определено, и в

качестве ограничений принята только грузоподъемность транспортного средства или максимальная длина маршрута.

Однако специфика оптимизации маршрутных схем ГПТ вносит ряд дополнительных ограничений в классическую постановку задачи, наряду с основными ограничениями задачи необходимо учитывать:

- 1) наличие нескольких депо;
- 2) ограничение, при котором начало и конец маршрута не должны находиться в одном депо (т. е. не все маршруты должны быть кольцевыми);
- 3) ограничение количества вершин в маршруте (ограничение маршрута по времени и максимальной длине).

Также необходимо обратить внимание на то, что при решении задач дискретной оптимизации, как правило, рассматривается лишь одна целевая функция с дополнительным набором ограничений. Данный подход не позволяет учесть взаимное влияние участников системы, что может привести на практике к выработке неэффективных решений. Поэтому необходимо определить критерий, который будет учитывать взаимовлияние интересов участников системы.

В качестве такого критерия оптимизации для системы ГПТ можно предложить плотность пассажиропотока на исследуемом участке дороги $A-B$ [17]:

$$D_{AB} = \frac{Q_{AB}^{sum}}{L_{AB}} \rightarrow \max,$$

$$\begin{cases} M = \{m_1, \dots, m_n\}, n > 1; & (1) \\ m_A \neq m_B; & (2) \\ L_{\min} \leq L_{AB} \leq L_{\max}; & (3) \\ Q_{AB}^{sum} > Q_{\min}; & (4) \end{cases}$$

где D_{AB} – плотность пассажиропотока на участке $A-B$; A – пункт отправления; B – пункт назначения; Q_{AB}^{sum} – общее количество пассажиров, которым необходимо добраться из пункта A в пункт B ; L_{AB} – длина исследуемого пути $A-B$; M – множество вершин депо; – вершина-депо, в которой начинается и заканчивается маршрут $A-B$; L_{\min}/L_{\max} – минимально и максимально допустимая длина маршрута;

та; Q_{\min} – минимальное количество пассажиров на маршруте.

В данной постановке задачи, с учетом того, что количество пассажиров Q_{AB}^{sum} является статистической величиной, оптимизировать плотность пассажиропотока возможно, только изменяя длину маршрута. Ограничения (1) и (2) на длину маршрута никак не влияют, они определяют только его топологию. Ограничение (4) регулирует количество пассажиров на маршруте. Соответственно, для максимизации данного показателя необходимо уменьшать длину маршрута (в соответствии с ограничением (3)), что позволит учесть интересы как пассажиров (сокращение времени поездки), так и транспортных организаций (увеличение прибыли, за счет более быстрой оборачиваемости подвижного состава). Таким образом, приведенный показатель позволяет учесть интересы сразу нескольких участников системы ГПТ.

Выводы

При анализе оптимизации маршрутных схем ГПТ были рассмотрены интересы всех участников системы городского транспорта и сформулированы показатели эффективности системы в целом.

Рассмотрена классическая задача маршрутизации транспорта, ее разновидности и методы решения. На основе анализа задач маршрутизации транспорта определены дополнительные ограничения, которые необходимо учитывать при оптимизации маршрутных схем ГПТ. В качестве критерия оптимизации для системы ГПТ предложено использовать плотность пассажиропотока на определенном участке дороги.

Анализ методов решения задач транспортной маршрутизации показал, что наиболее перспективными на сегодняшний день являются метаэвристические алгоритмы. Разрабатываемый алгоритм, дающий решение задачи транспортной маршрутизации с учетом ограничения количества вершин в одном маршруте, а также для нескольких депо и несовпадения начального и конечного депо для одного маршрута, ляжет в основу автоматизированной системы поддержки принятия решений для практического расчета эффективных маршрутов ГПТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горев А.В. Основы теории транспортных систем. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – 214 с.
2. Корягин М.Е. Равновесные модели системы городского пассажирского транспорта в условиях конфликта интересов. – Новосибирск: Наука, 2011. – 140 с.
3. Абрамов С. Как определить количество автобусов для городского маршрута // Автомобильный транспорт. – 1981. – № 5. – С. 17–18.
4. Вогулякова А.Е. Управление движением городского транспорта. 2008. URL: <http://www.beriki.ru/2008/10/18/upravlenie-dvizheniem-gorodskogo-transporta-chast> (дата обращения: 04.04.2013).
5. Болоненков Г.В. Организация скоростных автобусных сообщений в городах. – М.: Транспорт, 1987. – 160 с.
6. Блатнов М.Д. Пассажирские автомобильные перевозки. – М.: Транспорт, 1981. – 222 с.
7. Carrese S., Gori S. An urban bus network design procedure // Applied Optimization. – 2002. – V. 64. – P. 177–196.
8. Pattnaik S.B., Mohan S., Tom V.M. Urban bus transit route network design using genetic algorithm // Journal of Transportation Engineering. – 1998. – V. 124 (4) – P. 368–375.
9. Park S.J. Bus network scheduling with genetic algorithms and simulation. Master's thesis, University of Maryland. 2005. URL: <http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/2496/1/umi-umd-2373.pdf> (дата обращения: 01.04.2013).

10. Самойлов Д.С. Городской транспорт. – М.: Стройиздат, 1983. – 384 с.
11. Zhao F., Gan A. Optimization of transit network to minimize transfers. Tech. Rep. Florida, Department of Transportation, Florida international University. 2003. URL: http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed_Proj/Summary_PTO/FDOT_BD015_02rpt.pdf (дата обращения: 01.04.2013).
12. Yu B., Yang Z. Optimizing bus transit network with parallel ant colony algorithm // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – Bangkok, 2005. – V. 5. – P. 374–389.
13. Антошвили М.Е., Либерман С.Ю., Спирин И.В. Оптимизация городских автобусных перевозок. – М.: Транспорт, 1985. – 102 с.
14. Nallusamy R., Duaiswamy K., Dhanalaksmi R. Optimization of multiple vehicle routing problems using approximation algorithms // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2009. – V. 1 (3). – P. 129–135.
15. Bachelet B., Yon L. Enhancing theoretical optimization solutions by coupling with simulation // Proceeding of the 1st OICMS, Clermont-Ferrand. – France, 2005. – P. 331–342.
16. Christofides N. The vehicle routing problem // European Journal of Operational Research. – 1992. – V. 59. – P. 345–358.
17. Zhongzhen Ya., Bin Yu, Chuntian Ch. Parallel ant colony algorithm for bus network optimization // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2007. – V. 22. – P. 44–55.

Поступила 05.04.2013 г.

UDC 656.1:658.012.011.56

OPTIMIZATION OF PLANNING THE PUBLIC TRANSPORT ROUTES WHEN DEVELOPING THE AUTOMATED DECISION SUPPORT SYSTEMS

E.A. Kochegurova, Yu.A. Martynova

Tomsk Polytechnic University

The relevance of the work is determined by the need of urban transport route optimization under dynamic socio-economic development of cities. The authors have considered the urban passenger transport system which is a set of interdependent subsystems: «town», «transport», «passengers». The indicators of efficient functioning of urban passenger transport are determined for all participants in the system. The objectives of the optimization problem of urban passenger transport are given in general terms. The authors have described transport routing problem, have introduced its classic statement and known aspects of this problem. The paper introduces the known methods for solving transport problems: heuristics (classic) and metaheuristic methods. The criteria for optimization of route schemes of urban passenger transport which considers the mutual interests of all participants in the system are determined. The density of traffic flow in the target section of the road has been proposed as such optimization criterion for urban passenger transport system. The authors have determined the statement of optimization problem of urban passenger transport.

Key words:

Urban passenger transport system, efficiency indices, traveling salesman problem, vehicle routing problem, optimization.

REFERENCES

1. Gorev A.V. *Osnovy teorii transportnykh sistem* [Fundamentals of the theory of transport systems]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2010. 214 p.
2. Koryagin M.E. *Ravnovesnye modeli sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta v usloviyakh konflikta interesov* [Equilibrium model of urban passenger transport in terms of conflict of interest]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2011. 140 p.
3. Abramov S. Kak opredelit kolichestvo avtobusov dlya gorodskogo marshruta [How to determine the number of buses for city routes]. *Avtomobilnyi transport*, 1981, no. 5, pp. 17–18.
4. Vogulyakov A.E. *Upravlenie dvizheniem gorodskogo transporta* [Traffic control of urban transport]. 2008. Available at: <http://www.beriki.ru/2008/10/18/upravlenie-dvizheniem-gorodskogo-transporta-chast> (accessed 4 April 2013).
5. Bolonenkov G.V. *Organizatsiya skorostnykh avtobusnykh sobshcheniy v gorodakh* [Organization of bus rapid transit in cities]. Moscow, Transport Publ., 1987. 160 p.
6. Blatanov M.D. *Passazhirskie avtomobilnye perevozki* [Passenger transport by road]. Moscow, Transport Publ., 1981. 222 p.
7. Carrese S., Gori S. An urban bus network design procedure. *Applied Optimization*, 2002, vol. 64, pp. 177–196.
8. Pattnaik S.B., Mohan S., Tom V.M. Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 1998, vol. 124 (4), pp. 368–375.
9. Park S.J. *Bus network scheduling with genetic algorithms and simulation*. Master's thesis, University of Maryland. 2005. URL: <http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/2496/1/umi-umd-2373.pdf> (accessed 1 April 2013)
10. Samoylov D.S. *Gorodskoy transport* [City transport]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 384 p.
11. Zhao F., Gan A. *Optimization of transit network to minimize transfers*. Tech. Rep. Florida, Department of Transportation, Florida international University. 2003. URL: http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed_Proj/Summary_PTO/FDOT_BD015_02rpt.pdf (accessed 1 April 2013)
12. Yu B., Yang Z. Optimizing bus transit network with parallel ant colony algorithm. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. Bangkok, 2005, vol. 5, pp. 374–389.
13. Antoshvili M.E., Liberman S.Yu., Spirin I.V. *Optimizatsiya gorodskikh avtobusnykh perevozok* [Optimization of urban bus transport]. Moscow, Transport Publ., 1985. 102 p.
14. Nallusamy R., Duaiswamy K., Dhanalaksmi R. Optimization of multiple vehicle routing problems using approximation algorithms. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2009, vol. 1 (3), pp. 129–135.
15. Bachelet B., Yon L. Enhancing theoretical optimization solutions by coupling with simulation. *Proceeding of the 1st OICMS*, Clermont-Ferrand, France, 2005, pp. 331–342.
16. Christofides N. The vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 1992, vol. 59, pp. 345–358.
17. Zhongzhen Ya., Bin Yu, Chuntian Ch. Parallel ant colony algorithm for bus network optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2007, vol. 22, pp. 44–55.