

Раздел III. Проектирование и применение робототехнических и мехатронных систем

УДК 004.67

DOI 10.23683/2311-3103-2017-9-133-143

А.В. Голубев, М.В. Щербаков

МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ И ОЦЕНКИ МАРШРУТОВ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ГЕОРАСПРЕДЕЛЕННЫХ ДАННЫХ*

Развитие городов сопряжено с модернизацией существующей сети общественного транспорта. Возрастающие требования к качеству городской среды предполагают изменения подходов к решению задач развития городской инфраструктуры. Развитие транспортной системы города является важной частью государственной политики, так как существенно влияет на качество жизни в городе. Это необходимо для улучшения обслуживания населения, повышения деловой активности, обеспечения экономической стабильности города, повышения конкурентоспособности города. Для решения этой задачи, прежде всего, необходимо учитывать планы застройки и развития города, закономерности формирования спроса на перемещения по городу, выбирать оптимальные способы и маршруты перемещения, оптимизировать количество подвижного состава общественного транспорта, расписание движения и прочих факторов. В настоящее время повсеместный сбор данных и технологии их обработки, которые становятся всё дешевле и дешевле, и открывают новые возможности для проектировщиков. Мобильные операторы могут получать огромное количество обезличенных данных об их перемещении людей в городе. Исходя из предположения, что определенный человек имеет свои собственные «шаблоны перемещения», которые можно рассматривать в качестве личных транспортных предпочтений по перемещению. Располагая этими данными, мы можем понять реальные предпочтения и потребности людей в системе городского транспорта. И значит, что можно предложить изменения в транспортной сети или даже набор возможных альтернативных вариантов. Проблема заключается в том, как сделать рациональный выбор предпочтительной транспортной сети города транспорта в соответствии с: (i) набором выбранных критериев качества; (ii) предпочтениями лиц, принимающих решения. Для задачи оценки построенной транспортной сети в данной работе были использованы и представлены следующие критерии оценки: (i) степень удовлетворенности транспортного спроса, (ii) непрямолинейность транспортной сети и (iii) её плотность. Данная работа предлагает и описывает методы, которые позволяют на основе данных о предпочтениях жителей производить формирование оценки и модификацию схемы маршрутов общественного транспорта.

Городской пассажирский транспорт; планирование транспортной сети; поддержка принятия решений; предпочтения жителей; транспортные корреспонденции; планирование маршрутов; геораспределенные данные; ГИС; eCity.

* Данное исследование было частично поддержано РФФИ, исследовательским проектом № 16-37-60066, № 16-07-00388_a и исследовательским проектом MD-6964.2016.9.

A.V. Golubev, M.V. Shcherbakov

METHODS OF AUTOMATIC CONSTRUCTION AND EVALUATION OF PUBLIC TRANSPORT ROUTES BASED ON GEOSPATIAL DATA

The development of cities is associated with the modernization of the existing network of public transport. Increasing requirements to the quality of the urban environment suggest changes in approaches to solving the problems of urban infrastructure development. The development of the transport system of the city is an important part of public policy, since it significantly affects the quality of life in the city. This is necessary to improve public services, increase business activity, ensure the economic stability of the city, improve the city's competitiveness. To solve this problem, first of all, it is necessary to take into account the plans for building and development of the city, the laws governing the formation of demand for movement around the city, choose the optimal ways and routes for moving, optimize the number of public transport vehicles, timetables and other factors. Currently, the worldwide collection of data and processing technologies, which are becoming cheaper and cheaper, opens up new opportunities for designers. Mobile operators can receive a huge amount of impersonal data about movement of people in the city. Proceeding from the assumption that a certain person has his own "patterns of displacement", which can be considered as personal transport preferences for displacement. With these data, we can understand the real preferences and needs of people in the urban transport system. This means that it is possible to propose changes in the transport network or even a set of possible alternative options. The problem is how to make a rational choice of the city's preferred transport network in accordance with: (i) a set of selected quality criteria; (ii) the preferences of decision-makers. For the assessment of the constructed transport network, the following evaluation criteria were used and presented in this paper: (i) the degree of satisfaction of transport demand, (ii) the non-straightness of the transport network, and (iii) its density. In this paper, we propose methods that allow, based on data on the preferences of residents, to formulate, evaluate and modify the scheme of public transport routes.

City passenger transport; planning of the transport network; decision-making; preferences of residents; transport correspondence; route planning; geo-distributed data; GIS; eCity.

Введение. В настоящее время повсеместный сбор данных и технологии их обработки, которые становятся всё дешевле и дешевле, открывают новые возможности для проектировщиков. Мобильные операторы могут получать огромное количество обезличенных данных об их перемещении людей [1] в городе. Исходя из предположения, что определенный человек имеет свои собственные «шаблоны перемещения», которые можно рассматривать в качестве личных транспортных предпочтениях по перемещению [2]. Располагая этими данными можно оценить эффективность текущей транспортной сети и предложить модификацию на основе предпочтения граждан. Накапливая эти данные и применяя методы предиктивной аналитики можно принимать оптимальные решения по модернизации транспортной сети города, а также представлять возможные прогнозы изменения по перемещению жителей в городе.

Для решения данных проблем необходимо выполнить следующие процедуры [3]: сбор данных, обработка данных, создание набора субоптимальных маршрутов и выбор сети в соответствии с критериями качества.

Сбор данных требует методов для получения и предварительной обработки для дальнейшего эффективного хранения. Так как получение данных происходит от каждого отдельного человека, то имеем возможность оценить наиболее оптимальные места в качестве узловых маршрутов общественного транспорта. Уменьшение количества оригинальных узлов графа позволяет выявить центры кластеров и узлов, для того, чтобы понять, где можно разместить остановочный пункт общественного транспорта.

Следующим шагом является объединение центров кластеров для создания субоптимальных маршрутов сети общественного транспорта. Это очень сложная многокритериальная задача с множеством ограничений. Эта проблема лежит на пересечении проблемы поиска кратчайшего пути и задачи выбора маршрута транспортного средства с входным параметром пассажиропотока. Задача о поиске кратчайшего пути является наиболее известной, для которой есть много эффективных и быстрых программных реализаций, например, Open Source Routing Machine [4]. Однако, есть несколько особенностей в данной задаче, такие что базовые алгоритмы не могут быть применены в текущем виде. В отличие от задачи о поиске кратчайшего пути с функцией затрат, рассматривается более сложная функция стоимости, которая может включать время пешего хода, время, проведённое в пути и другие количественные изменения. Все эти переменные являются усредненными по числу жителей. Кроме того, важным различием между этими алгоритмами является, что конечная точка в маршруте не может быть произвольной, так как каждый маршрут должен содержать узлы, которые представляют собой центры кластеров, определенных на предыдущем шаге.

И переходя к последнему шагу оценки построенной транспортной сети можно выделить достаточно большое количество критериев, по которым можно производить оценку транспортной сети. Например, до середины 1990-х годов в СССР и России основным показателем качества являлся коэффициент качества [5], который определяется как отношение величины затрат времени на поездку при заданных теоретически абсолютно комфортных условиях поездки, к фактическим затратам времени на поездку в реальных условиях.

В данной работе остановимся методах оценки транспортной сети и рассмотрим их более подробно.

Обзор существующих методов. Развитие транспортной системы города является важной частью государственной политики, так как существенно влияет на качество жизни в городе. Для решения этой задачи, прежде всего, необходимо учитывать планы застройки и развития города, закономерности формирования спроса на перемещение по городу, выбирать оптимальные способы и маршруты перемещения, оптимизировать количество подвижного состава общественного транспорта, расписание движения и прочие [6–8].

Транспортная система должна обеспечивать:

- ◆ потребности жителей города в перемещениях;
- ◆ соответствие транспортного спроса и транспортного предложения;
- ◆ оптимизацию транспортных расходов администрации города и населения;
- ◆ получение прибыли транспортными предприятиями.

Проекты модернизации транспортной системы направлены на повышение эффективности ее функционирования.

В связи с этим возникает проблема оценки эффективности функционирования существующих и проектируемых транспортных систем. Следует отметить, что до настоящего времени нет единого подхода к решению этой задачи.

До последнего времени наиболее часто в качестве критерия эффективности транспортной сети использовался коэффициент качества K_k :

$$K_k = t_{\text{пер}}^3 / t_{\text{пер}}^3, \quad (1)$$

где $t_{\text{пер}}^3$ – величина затрат времени на поездку при заданных теоретически абсолютно комфортных условиях поездки; $t_{\text{пер}}^3$ – величина фактических затрат времени на поездку в реальных условиях.

Нормативы затрат времени одного пассажира на поездки городским автобусом не учитывают планировку городов [9]. Время, затрачиваемое на поездку, включает подходы к остановочному пункту и месту назначения; поездку в транспорте; пересадке на другой маршрут; ожиданию транспорта из-за отказов в посадке вследствие перегруза транспортного средства.

В работе [10] предлагается определять показатель качества транспортного обслуживания в городах согласно выражению:

$$K_k = t_n / t_\phi - y_n / y_\phi - R, \quad (2)$$

где t_n – норматив времени, затрачиваемого пассажиром на поездку; t_ϕ – время, фактически затрачиваемое пассажиром на поездку, мин.; y_n – нормативный коэффициент наполнения, рекомендуемый для городских перевозок в среднем не более 0.3, а в часы пик 0.8; y_ϕ – фактическое значение коэффициента наполнения; R – показатель регулярности движения [10].

В работе [11] развивается понятие комплексного, интегрированного показателя качества, учитывающего различные факторы сервисного обслуживания пассажиров. Комплексный показатель уровня пассажирского сервиса S , предложенный в [12], определяется зависимостью:

$$S = \sum_{i=1}^6 S_i K_i, \quad (3)$$

где S_1 – надежность перемещения точно по графику (время поездки); S_2 – доступность (частота движения общественного транспорта); S_3 – безопасность (вероятность безотказной работы общественного транспорта); S_4 – комфортность (качество поездки); S_5 – стоимостный показатель – величина транспортного тарифа; S_6 – показатель информационного сервиса (уровень информационного обеспечения); $K_1 \dots K_6$ – показатели степени, характеризующие весомость соответствующего показателя уровня сервиса.

В работе [11] был рассмотрен комплекс критериев, которые позволяют определить качество и эффективность работы муниципальной пассажирской транспортной системы. Все критерии предлагают разбить на две группы:

- ◆ социально-экономические показатели обслуживания пассажиров;
- ◆ показатели эффективности работы субъектов транспортных предприятий.

Муниципальную пассажирскую транспортную систему представляют кортежем (см. формула (4)).

$$S = \langle P_1, \dots, P_i, E_1, \dots, E_j \rangle, \quad (4)$$

где P – параметры системы, характеризующие ее состояние; E – спрос на транспортные услуги.

Так же авторы выделяют ряд критериев для определения уровня сервиса, к ним относятся:

- ◆ надежность транспортных средств;
- ◆ комфортность перевозок;
- ◆ информирование пассажиров;
- ◆ безопасность;
- ◆ стоимость;
- ◆ экологичность.

В работе Варелопуло Г.А. «Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте» [13] качество обслуживания пассажиров ГПТ определяется следующими показателями:

- ◆ доступность;
- ◆ комфорт поездки;

- ◆ минимум затрат времени на передвижение по городу;
- ◆ высокая надежность работы подвижного состава;
- ◆ регулярность сообщений при безусловном обеспечении безопасности перевозок.

Спирин И.В. приводит следующую систему показателей для оценки качества перевозок пассажиров [14]:

- ◆ доступность (плотность маршрутной сети, информационное обслуживание, приемлемость тарифов);
- ◆ результативность (затраты времени на поездку, уровень транспортной усталости);
- ◆ надежность (коэффициент регулярности, уровень отказа в посадке, показатель безопасности движения);
- ◆ удобство пользования (коэффициент использования вместимости, соответствие нормативам комфортабельности)

На основании вышеизложенного были выделены критерии для оценки эффективности транспортной системы:

- ◆ степень удовлетворения транспортного спроса;
- ◆ комфортность;
- ◆ коэффициент непрямолинейности;
- ◆ плотность транспортной сети.

На данном этапе систему критериев не включены экономические и экологические критерии в связи с необходимостью дополнительных исследований в этой области.

Используемые критерии расчёта. Рассмотрим более подробно выбранные критерии расчета оценки эффективности транспортной сети:

Степень удовлетворения транспортного спроса:

$$U = \frac{1}{C} \sum_{i=0}^N u_i, \quad (5)$$

где U – степень удовлетворения транспортного спроса – вещественно безразмерное число $[0; 1]$; N – максимальное кол-во пересадок; u_i – количество пассажиров, перевезённых с i пересадками; C – общее число пассажиров, нуждающихся в перевозке.

Непрямолинейность транспортной сети:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{\sum_{i=1}^N L_i}, \quad (6)$$

где P – коэффициент непрямолинейности транспортной сети – вещественное безразмерное число $[0; 1]$; N – количество маршрутов в транспортной системе; L_i – длина i -го маршрута; D_i – расстояние от начала i -го маршрута до его конца по воздуху.

Плотность транспортной сети:

$$L = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^N L_i, \quad (7)$$

где L – плотность транспортной сети – вещественное неотрицательное число с размерностью; N – количество маршрутов в транспортной системе; L_i – длина i -го маршрута; S – площадь города.

Как видим первые два критерия безразмерные, а последний имеет единицу измерения. Для того, чтобы использовать все эти критерии в интегральной формуле необходимо пронормировать плотность транспортной сети. Основываясь на мнении эксперта, было установлено, что максимальная удаленность от транспортной линии составляет 0,5 км. Тогда предельная длина транспортной сети на один

квадратный километр будет равной 4 км, т.е. является периметром для этого квадрата. В связи с этим формула расчета плотности транспортной примет вид:

$$L = \frac{1}{4S} \sum_{i=1}^N L_i, \quad (8)$$

где L – плотность транспортной сети – вещественное безразмерное число $[0; 1]$; N – количество маршрутов в транспортной системе; L_i – длина i -го маршрута; S – площадь города.

Так как, чем меньше плотность транспортной сети, тем эта транспортная сеть лучше, формула (8) примет вид:

$$L = 1 - \frac{1}{4S} \sum_{i=1}^N L_i. \quad (9)$$

Методика расчёта. Прежде чем перейти описанию методов расчёта, сформулируем задачу. Имеем данные о потребности перемещения пассажиров, которые представлены в виде направленного взвешенного графа $G(K, S)$, где K – множество вершин (выделенные кластеры мест назначения); S – множество весов (пассажиропоток). Кластер $k = \{r, c\}$, где r – радиус в десятичных градусах, c – координаты центра кластера в десятичных градусах. Пассажиропоток $s = \{k_i, k_j, n\}$, где $k_i \in K$ – кластер, из которого имеется потребность перемещения, $k_j \in K$ – кластер, в который имеется потребность перемещения, n – количество людей в единицах, которые имеют потребность перемещения из k_i в k_j . Также имеем систему анализируемых маршрутов W . Маршрут $w = \{P\}$, где P – множество точек с координатами, описанными в десятичных градусах. Тогда задачу можно описать следующей формулой:

$$\{G(K, S), R | I, O\}. \quad (10)$$

где G – направленный взвешенный граф; K – множество вершин; S – множество весов графа; R – множество маршрутов; I – значения критериев; O – оценка транспортной системы.

Для того чтобы произвести оценку транспортной сети по нескольким критериям в данной работе предлагается к использованию следующая формула:

$$O(I, W) = \frac{\sum_{i=1}^N I_i W_i}{\sum_{i=1}^N I_i}, \quad (11)$$

где O – интегральная оценка транспортной системы; I – значение критериев; W – веса для критериев, определяющие их важность; N – кол-во критериев. Перейдём непосредственно к оценке транспортной сети и для расчёта всех критериев (представленных в разделе Используемые критерии расчёта) необходимо знать следующее:

1. Площадь города.
2. Количество пересадок между всеми имеющимися узлами в транспортной сети.
3. Общее количество людей для перевозки.

Пункт 1 можно рассчитать в автоматическом режиме, т.к. имеется большое количество библиотек работающих с геоданными [15–18], или взять известное значение для исследуемого города из доступных источников. Также можно в автоматическом режиме рассчитать пункт 3 располагая данными матрицы корреспонденций. Остаётся пункт 2 и тут задача немного усложняется. Для нахождения всех пересадок нам необходимо построить граф сети, с учётом пересадок между маршрутами.

На входе мы имеем непересекающийся набор (список) маршрутов, который задан (списком/набором) кластеров.

Задача построить граф транспортной сети, где маршруты будут объединены между собой рёбрами (пересадка между маршрутами) с наименьшим значением пешего хода (между ними).

В общем задачу сводится к нескольким шагам:

1. Инициализация матрицы смежности по данным из имеющимся маршрутов.
2. Нахождение рёбер между парами маршрутов с минимальной длиной.
3. Нахождение кратчайших путей от каждого кластера к каждому, используя алгоритм Флойда-Уоршелла.
4. Подсчёт количества пересадок между каждой парой кластеров.

Рассмотрим более подробно каждый из шагов.

Инициализация матрицы смежности. На входе алгоритма имеем список маршрутов R и S – количество маршрутов, а на выходе M – матрица смежности. Задача сводится к занесению в матрицу смежности информации о связанных парах кластеров. Т.е. напротив i -ой и j -ой ячейки связанных узлов записывается метка, которая указывает на то, что узлы связаны в маршрут. В результате мы получаем начальную матрицу смежности, где соседние узлы в маршрутах являются связанными.

Нахождение рёбер с минимальной длиной. На входе данного алгоритма имеем список маршрутов R и матрицу смежности M . Задача сводится к поиску расстояний между каждыми парами узлов из соседних маршрутов и выбирается то расстояние, которое является наименьшим. И когда найдены эти узлы производится запись в матрицу смежности метки о том, что данные узлы маршрутов связаны между собой пересадкой.

Нахождение кратчайших путей. Эта задача является хорошо исследуемой и сводится к поиску кратчайших путей между всеми узлами в сети. В данной работе используется алгоритм Флойда-Уоршелла [19] с возможностью восстановления путей.

Подсчёт количества пересадок. На входе данного алгоритма имеем общее количество кластеров N , матрица смежности M и матрица корреспонденций S . На выходе – список количества пересадок T . Данная задача решается подсчётом количества пересадок полным перебором всех возможных точек отправления и назначения. Т.е. на выходе имеем список, где индекс i указывает на количество пересадок, а значение в этой ячейке – сколько раз была совершена i -ая пересадка. Подсчёт ведётся следующим образом: мы выбираем узел отправления A и узел назначения B , с помощью модифицированного алгоритма Флойда-Уоршелла восстанавливаем путь между этими узлами. Далее проходим по полученному списку узлов и считаем количество меток указывающих на пеший ход. Результат вносится в список T .

Результаты. Для проверки предложенного метода оценки, эксперту было предложено построить несколько вариантов транспортных сетей по имеющемуся набору данных. Для примера была выбрана небольшая часть города с нанесёнными 8 кластерами. Также выбраны несколько маршрутов общественного транспорта, которые проходят в данной части города.

Рис. 1,а,б,в показывают три вида транспортной сети, которые были предложены экспертом, а также рис. 1,г, который был получен в автоматическом режиме с использованием метода Zero-Network из [20].

Сделаем уточнение, что маршруты проходящие через кластеры были построены по существующим дорогам с использованием OSRM.

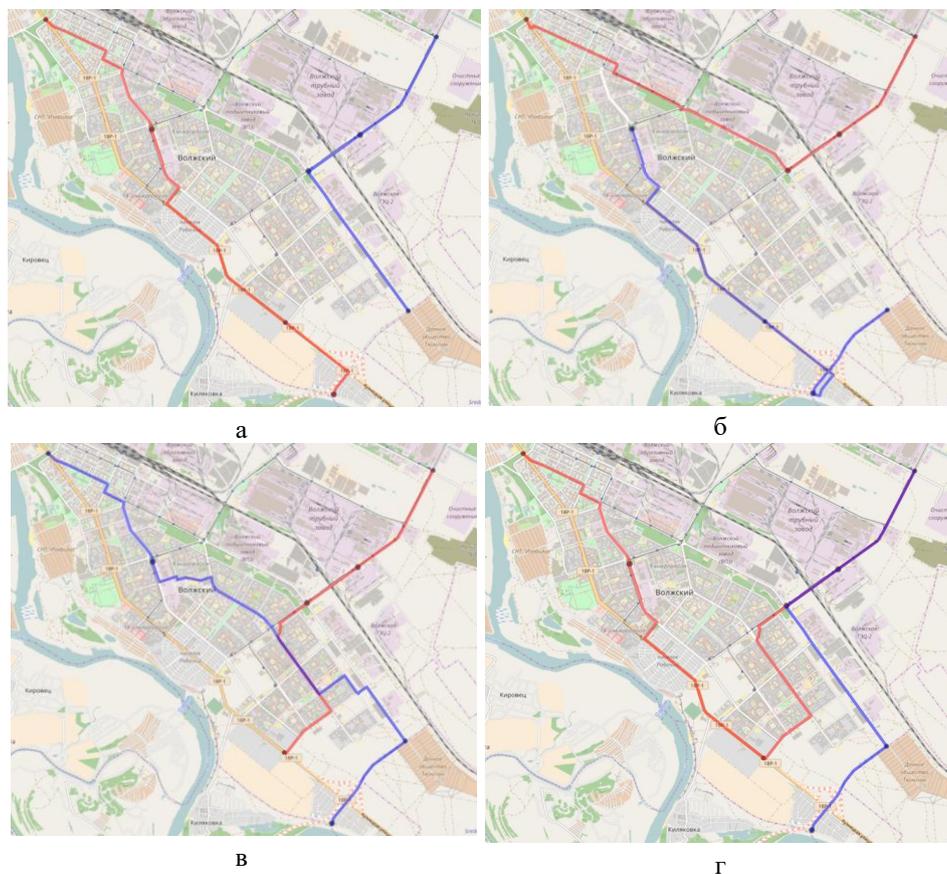


Рис. 2. Построенные конфигурации транспортных сетей: а, б, в – конфигурации предложенные экспертом; г – транспортная сеть построенная в автономном режиме

Таблица 1

Результаты расчёта оценки качества транспортной сети с использованием интегрального критерия $O(I, W)$ (больше – лучше)

Транспортная сеть	Значение $O(I, W)$
Экспертная-1	0.347
Экспертная-2	0.351
Экспертная-3	0.366
Zero-Network	0.351

Сравнивая полученные результаты (табл. 1) можно сделать вывод, что транспортная сеть №3, предложенная экспертом является более эффективной. Вторыми по эффективности являются транспортная сеть №2 и Zero-Network. Рассматривая вид построенных транспортных сетей можно сделать вывод, что в данном случае качество сети зависит от кластеров отправления-назначения.

Заключение. Система общественного транспорта является одним из ключевых элементов развития качества жизни современного города. Анализ предпочтений населения и построение оптимальной и сбалансированной сети маршрутов на основе данных движения могут стать стимулом для устойчивого развития города в целом.

В статье представлены метод оценки транспортной сети в автоматическом режиме с использованием геопространственных данных о перемещении жителей в городе. Основная идея работы – оценка транспортной сети по критериям эффективности. В работе предложены три критерия качества для оценки транспортной сети: степень удовлетворения потребностей в транспорте, непрямолинейность транспортной сети, плотность транспортной сети и способ их расчета на основе имеющихся данных.

Метод оценки транспортной сети, используемый совместно с алгоритмом построения транспортной сети [20], могут быть использованы для внесения изменений в существующую транспортную сеть, позволив подстроить её под текущие потребности в перемещении. Основная проблема, которую нужно решить в будущем – проверить разработанный метод на реальном наборе данных. Следующим этапом в исследовании будет сбор реальных данных с последующим анализом закономерностей в них, чтобы можно было принимать более оптимальные решения по модификации транспортных сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Львова А.* Как урбанисты исследуют мобильность горожан. – URL: <http://strelka.com/ru/magazine/2017/01/23/how-to-explore-urban-mobility> (дата обращения: 10.09.2017).
2. *Golubev A. et al.* Strategway: web solutions for building public transportation routes using big geodata analysis // Proceedings of the 17th International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services. – ACM, 2015. – С. 91.
3. *Щербаков М.В. и др.* Автоматизация поддержки принятия решений по разработке маршрутов общественного транспорта на основе анализа корреспонденций жителей // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 8. – С. 29-33.
4. *Luxen D., Vetter C.* Real-time routing with OpenStreetMap data // Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems. – ACM, 2011. – P. 513-516.
5. *Тлегенов Б.Н.* Анализ методов оценки и показателей качества системы городского пассажирского транспорта // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3.
6. *Sadovnikova N. et al.* Models and methods for the urban transit system research // Creativity in Intelligent, Technologies and Data Science: First Conference, CIT&DS 2015, Volgograd, Russia, September 15–17, 2015: Proceedings. – Springer International Publishing, 2015. – P. 488-499.
7. *Ceder A.* Designing Public Transport Networks and Routes // Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning. – Emerald Group Publishing Limited, 2002. – P. 59-91.
8. *Nielsen G., Lange T.* Network design for public transport success—theory and examples // Norwegian Ministry of Transport and Communications, Oslo. – 2008.
9. *Гудков, В.А., Миротин Л.Б., Вельможин А.В., Ширяев С.А.* Пассажирские автомобильные перевозки: учебник для вуза / под ред. В.А. Гудков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 448 с.
10. *Большаков А.М.* Повышение уровня обслуживания пассажиров автобусами на основе комплексной системы управления качеством. – М.: Транспорт, 1981. – 174 с.
11. *Турпищева М.С., Нурғалиев Е.Р.* Методика оценки качества системы пассажирских автоперевозок // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2014. – № 1. – С. 42-46.
12. *Шабанов А.В.* Региональные логистические системы общественного транспорта: методология формирования и механизм управления. – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВЦ, 2001. – 205 с.
13. *Варелопуло Г.А.* Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте. – М.: Транспорт, 1990. – 208 с.
14. *Спирин И.В.* Организация и управление пассажирскими автомобильными перевозками: учеб. для студ., учреждений среднего проф. образования. – 5-е изд., перераб. – М.: Академия, 2010. – 400 с.

15. Geographic Library. – URL: <https://geographiclib.sourceforge.io/> (дата обращения: 12.09.2017).
16. GEO Python. – URL: https://github.com/JerryLeooo/geo_python (дата обращения: 12.09.2017).
17. Geospatial Data Abstraction Library. – URL: <http://www.gdal.org/> (дата обращения: 12.09.2017).
18. PROJ4. – URL: <https://github.com/jswhit/pyproj> (дата обращения: 12.09.2017).
19. Алгоритм Флойда-Уоршелла. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Floyd-Warshall_algorithm (дата обращения: 20.07.2017).
20. *Shcherbakov M., Golubev A.* An algorithm for initial public transport network design over geospatial data // Smart Cities Conference (ISC2), 2016 IEEE International. – IEEE, 2016. – P. 1-7.

REFERENCES

1. *L'vova A.* Kak urbanisty issleduyut mobil'nost' gorozhan [Electronic resource]. Available at: <http://strelka.com/ru/magazine/2017/01/23/how-to-explore-urban-mobility> (accessed 10 September 2017).
2. *Golubev A. et al.* Strategway: web solutions for building public transportation routes using big geodata analysis, *Proceedings of the 17th International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services*. ACM, 2015, pp. 91.
3. *Shcherbakov M.V. i dr.* Avtomatizatsiya podderzhki prinyatiya resheniy po razrabotke marshrutov obshchestvennogo transporta na osnove analiza dannykh o korrespondentsiyakh zhiteley [Automated decision support for the development of public transport routes on the basis of the analysis of correspondence of residents], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of computer and information technology], 2016, No. 8, pp. 29-33.
4. *Luxen D., Vetter C.* Real-time routing with OpenStreetMap data, *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems*. ACM, 2011, pp. 513-516.
5. *Tlegenov B.N.* Analiz metodov otsenki i pokazateley kachestva sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta [Analysis of evaluation methods and quality indicators of urban passenger transport], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2012, No. 3.
6. *Sadovnikova N. et al.* Models and methods for the urban transit system research, *Creativity in Intelligent, Technologies and Data Science: First Conference, CIT&DS 2015, Volgograd, Russia, September 15–17, 2015: Proceedings*. Springer International Publishing, 2015, pp. 488-499.
7. *Ceder A.* Designing Public Transport Networks and Routes, *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*. Emerald Group Publishing Limited, 2002, pp. 59-91.
8. *Nielsen G., Lange T.* Network design for public transport success—theory and examples, *Norwegian Ministry of Transport and Communications, Oslo*, 2008.
9. *Gudkov, V.A., Mirotin L.B., Vel'mozhin A.V., Shiryayev S.A.* Passazhirskie avtomobil'nye perevozki: uchebnyk dlya vuza [Road passenger transport: the textbook for universities], ed. by V.A. Gudkov. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004, 448 p.
10. *Bol'shakov A.M.* Povyshenie urovnya obsluzhivaniya passazhirov avtobusami na osnove kompleksnoy sistemy upravleniya kachestvom [Increasing the level of passenger service buses on the basis of the integrated quality management system]. Moscow: Transport, 1981, 174 p.
11. *Turpishcheva M.S., Nurgaliev E.R.* Metodika otsenki kachestva sistemy passazhirskikh avtoperevozok [Methods of evaluation of the quality of passenger transportation system], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Astrakhan state technical university], 2014, No. 1, pp. 42-46.
12. *Shabanov A.V.* Regional'nye logisticheskie sistemy obshchestvennogo transporta: metodologiya formirovaniya i mekhanizm upravleniya [Regional logistical system of public transport: methodology for the formation and control mechanism]. Rostov-on-Don: SKNTs VShch, 2001, 205 p.
13. *Varelopulo G.A.* Organizatsiya dvizheniya i perevozok na gorodskom passazhirskom transporte [Organization of traffic and transport in urban passenger transport]. Moscow: Transport, 1990, 208 p.

14. Spirin I.V. Organizatsiya i upravlenie passazhirskimi avtomobil'nymi perevozkami: ucheb. dlya stud., uchrezhdeniy srednego prof. obrazovaniya [Organization and management of passenger road transport: the textbook for students of institutions of secondary professional education]. 5 ed. Moscow: Akademiya, 2010, 400 p.
15. Geographic Library. Available at: <https://geographiclib.sourceforge.io/> (accessed 12 accessed 2017).
16. GEO Python. Available at: https://github.com/JerryLeooo/geo_python (accessed 12 accessed 2017).
17. Geospatial Data Abstraction Library. Available at: <http://www.gdal.org/> (accessed 12 accessed 2017).
18. PROJ4. Available at: <https://github.com/jswhit/pyproj> (accessed 12 accessed 2017).
19. Algoritm Floyd-Uorshella [Algorithm Of Floyd-Warshell]. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Floyd-Warshall_algorithm (accessed 12 accessed 2017).
20. Shcherbakov M., Golubev A. An algorithm for initial public transport network design over geospatial data, *Smart Cities Conference (ISC2), 2016 IEEE International*. IEEE, 2016, pp. 1-7.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент И.М. Бородянский.

Голубев Алексей Владимирович – ВолгГТУ; e-mail: alexey.golubev@vstu.ru; Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28; аспирант.

Щербаков Максим Владимирович – e-mail: maxim.shcherbakov@vstu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования; зав. кафедрой; д.т.н.

Golubev Alexey Vladimirovich – Volgograd State Technical University; e-mail: alexey.golubev@vstu.ru; Volgograd, Pr. Lenin, 28, Russia; postgraduate student.

Shcherbakov Maxim Vladimirovich – e-mail: maxim.shcherbakov@vstu.ru; the department of computer-aided design and search construction; head the department; dr. of eng. sc.

УДК 621.865.8+62-503.5

DOI 10.23683/2311-3103-2017-9-143-153

Н.С. Воробьева, В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов, А.В. Дяшкин

РАЗРАБОТКА БАЗЫ МОДЕЛЕЙ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ*

Целью данной работы является разработка метода синтеза базы моделей и управлений (БМУ) программных движений манипуляционной системы параллельно-последовательной структуры с последовательным трехстепенным управляемым захватом, учитывающего особенности применения в технологических процессах промышленного производства и в перерабатывающей промышленности. Исследуется манипулятор параллельно-последовательной структуры, установленный на поворотном основании. Отличительной особенностью манипулятора является пересечение геометрических осей исполнительных звеньев механизма в точке их крепления, позволяющее исключить изгибающий момент от внешних нагрузок. Приведена кинематическая схема манипулятора, построенного на основе трипода и захватного устройства с тремя степенями свободы. В работе представлены перемещения рабочего органа манипулятора при выполнении технологических операций и рассматривается одно из перемещений рабочего органа – вертикальное прямолинейное движение (ВД). Для формирования базы моделей и управлений (БМУ) применен лингвистический аппроксиматор, предназначенный для описания траекторий, описывающих все возможные технологические движения механизма в реальном масштабе времени. Разработана математическая модель динамики движений манипулятора параллельно-последовательной структуры с семью степенями свободы. Приведен динамический

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-48-34039p_a, 16-38-00485 мол_a.