УДК 519.8, 656 JEL R41, C02 DOI 10.26425/1816-4277-2021-5-109-116

Егоров Владислав Валерьевич
канд. физ.-мат. наук, ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», г. Москва, Российская Федерация
ORCID: *0000-0003-4735-989X*
e-mail: *yegoroff_vv@mail.ru*

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПУТИ В УСЛОВИЯХ МНОГОВИДОВЫХ ПАССАЖИРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Аннотация. *Предложены методы поиска путей проезда пассажира в условиях, когда требуется учет одного или нескольких оптимизационных критериев при наличии пешеходной системы и многовидовых транспортных систем со своими топологиями, наборами параметров и тарифных планов. Исследование проводилось посредством математического моделирования транспортной системы в виде ее детерминированной графовой модели. В качестве базового алгоритма, на основе которого проводились модификации прежних и конструирование новой поисковой методики, был выбран алгоритм Дейкстры. В результате получены алгоритмы решения однокритериальных и многокритериальных задач на графах. Для многокритериальных задач использован метод свертки и метод упорядочения критериев по степени убывания их значимости. Область применения разработанных алгоритмов – информационные системы, ориентированные на конечного пользователя и на структуры, проектирующие транспортные сети и управляющие ими.*

Ключевые слова: *моделирование транспортной системы, задача о минимальном пути, задача о кратчайшем пути, алгоритм Дейкстры, многокритериальная оптимизация, пассажирские перевозки, общественный транспорт, многовидовые транспортные системы*

Для цитирования: Егоров В.В. Многокритериальная рационализация пути в условиях многовидовых пассажирских транспортных систем//Вестник университета. 2021. № 5. С. 109–116.

Vladislav V. Egorov
Cand. Sci. (Phys.-Math.), State University of Management, Moscow, Russia
ORCID: *0000-0003-4735-989X*
e-mail: *yegoroff_vv@mail.ru*

MULTI-CRITERIA PATH RATIONALIZATION IN THE CONDITIONS OF MULTI-TYPE PASSENGER TRANSPORT SYSTEMS

Abstract. *The article proposes methods of searching passenger travel routes in conditions where one or more optimization criteria must be taken into account in the presence of a pedestrian system and multi-type transport systems with their topologies, sets of parameters and tariff plans. The author carried out the research by means of mathematical modeling of the transport system in the form of its deterministic graph model. The author chose Dijkstra's algorithm as the basic algorithm, on the basis of which the modifications of the previous ones were carried out and the construction of a new search technique was carried out. As a result, the study obtained algorithms for solving single-criteria and multi-criteria problems on graphs. For multicriterial problems, the author used the convolution method and the method of ordering criteria by the degree of decreasing their significance. The field of application of the developed algorithms is information systems focused on the end user and on the structures that design and manage transport networks.*

Keywords: *transport system modeling, minimal path problem, shortest-path problem, Dijkstra's algorithm, multicriteria optimization, civil passenger traffic, public transport, multi-type transport systems*

For citation: Egorov V.V. (2021) Multi-criteria path rationalization in the conditions of multi-type passenger transport systems. *Vestnik universiteta*, no. 5, pp. 109–116. DOI: 10.26425/1816-4277-2021-5-109-116

Введение

Экономико-социальные проблемы развития территорий как в масштабах государства, так и конкретных регионов и муниципалитетов, в частности касающиеся пока недостаточной в России транспортной полицентричности и связности, влекущие разнородные негативные эффекты в зависимости от масштаба ситуации, только усиливают свою остроту со временем. Это связано со сложностью проблематики и, по словам российского урбаниста, академика Российской академии архитектуры и строительных наук Ю. П. Бочарова, с отсутствием должного систематического научного фундамента в представлениях об устройстве городов и транспортных систем [1]. Некоторые основы теории заложены в работах G. B. Dantzig и E. W. Dijkstra [14; 15]. На решение ее задач направлены исследования и практики в области урбанистики с учетом современных концептуальных требований городского и междугороднего транспортного планирования [1; 4; 17].

В Российской Федерации на сегодняшний день проводятся мероприятия по внедрению проекта «Умный город» в рамках национальной программы «Цифровая экономика» [7]. Заявлено, что цель указанного проекта состоит как в цифровой трансформации и автоматизации имеющихся процессов городской и коммунальной инфраструктуры, так и в комплексном повышении их эффективности [8]. Одной из категорий проекта является «Транспорт» с сопутствующими подразделами [9].

Специфика развития городской инфраструктуры подразумевает множественность видов транспортных коммуникаций, а скорость динамики этого процесса замедляется, в том числе, из-за недостаточной разработанности моделей пересадок и транспортно-пересадочных узлов [2; 6].

Ведущий российский специалист в области транспорта, профессор М. Я. Блинкин неоднократно обращал внимание на положительный зарубежный опыт для уменьшения траффика посредством мер, вынуждающих пересаживаться с личного транспорта на общественный, в том числе при помощи формирования на территории специализированных зон с разной тарифной системой перемещения и паркинга [5]. Разнообразие тарификаций в разных транспортных системах и возможность зональности оплаты проезда требуют дополнительных исследований, актуальных для потребителей транспортных услуг.

Один из критериев, по которому город относят к категории «умный», – наличие в нем оптимизационных подходов к дорожному траффику [10]. Настоящее исследование посвящено пассажирским перевозкам. Оно связано с рационализацией пути следования между заданными пунктами, проводимой по одному или нескольким критериям, причем в условиях множественности и разнородности транспортных систем, соединяющих транспортные узлы города, агломерации, региона или страны.

Методологические аспекты

Цель статьи состоит в конкретизации и совершенствовании подходов к разработке алгоритмов решения одно- и многокритериальных задач минимизации пути, используемых как для отдельно взятого пассажира, так и для структур, проектирующих транспортные сети (далее – ТС) и управляющих ими для расширения транспортной доступности.

Транспортная доступность – многоплановое понятие. Так, еще в 1881 г. английский ученый Ф. Гальтон ввел в рассмотрение и составил «карту изохрон», то есть зон приблизительно равной по времени доступности относительно Лондона [16]. Для градостроительной практики весомы и вопросы проектирования ТС, обеспечивающих как можно большему количеству потенциальных пассажиров возможность относительно быстро добраться до значимых мест территории. Однако в данной работе топологическая корректировка не предполагается. Изучим ситуацию в рамках сложившейся дорожной сети с уже имеющимися общественными транспортными линиями, узлами, видами транспорта, но с новыми учитываемыми данными, параметрами, критериями, а также метрическими, временными, тарифными возможностями или ограничениями на тех или иных ее участках. Заметим, что в этом случае не требуется дополнительных изысканий, учитывающих эффекты типа парадокса Браеса, когда расширение возможностей для набора потребителей транспортных услуг может повлечь ухудшение ситуации [13].

Рассмотрим набор различных типов ТС, формирующих общую дорожную схему. У каждой из этих сетей собственная ценовая политика, тарифные планы. Заданы возможные критерии принятия решения о маршруте пассажира:

– минимизация времени поездки между двумя заданными пунктами;
– минимизация стоимости поездки между двумя заданными пунктами;
– минимизация количества пересадок при поездке между двумя заданными пунктами;
– планирование поездки между двумя заданными пунктами, учитывающее несколько критериев, типа приведенных выше.

Классический способ нахождения минимального (по длине, стоимости и др.) пути состоит в применении алгоритма Дейкстры к детерминированной графовой модели ситуации [15]. Его сложность полиномиальна относительно количества вершин сети, а в ряде случаев и ниже, – значит быстродействие этого алгоритма достаточно высоко. Изучение алгоритма Дейкстры привело к разработке другого способа получения решения, также основанного на пометках вершин и, судя по многочисленным экспериментальным проверкам, значительно более быстрого [11]. Есть и иные современные разработки [12]. Однако в этих алгоритмах нет акцентирования на множественности ТС. А в отношении таких геоинформационных сервисов, как Google Maps, Яндекс.Карты, 2ГИС и прочие, заметим, что они решают однокритериальные задачи поиска способа проезда между заданными пунктами, минимизируя лишь суммарное время проезда.

Многокритериальность рассматривалась в работе В. Н. Кубила, при этом разбиралось применение эвристик к задаче с разнородным парком транспортных средств, перемещаемых по единой для всех ТС дорожной сети [3].

Для решения задач настоящего исследования не принципиально, какой оптимизационный алгоритм может быть выбран в дальнейшем в качестве базового, так как излагаемый в статье подход представляет собой «надстройку» над ним. Указанная надстройка представляет собой последовательность действий, которая обладает набором функций, соответствующим конкретному поисковому запросу. Пусть для определенности базовым будет выбран стандартный алгоритм Дейкстры. Методология исследования предполагает рассуждения от простых к сложным и поэтому для начала следует идеализировать ситуацию в достаточной степени, не учитывая, например, различные виды тарифов внутри одной ТС, типа имеющихся в Московском метро (их учет потребовал бы добавить в модель ТС, дублирующие друг друга по топологии и по некоторым характеристикам, но с различающейся ценовой политикой).

Формализация исследуемой ситуации

Пусть $T = \{T_k\}_{k = 0,1,\dots,s}$ – множество имен имеющихся ТС, из которых выделим T_0 – пешеходную, носящую вспомогательный характер и состоящую в основном из пересадок или переходов между остановками одной и той же непешеходной ТС или разных ТС.

Практическая ситуация моделируется в виде орграфа $G = \{V, E\}$, вершинам и ребрам которого дополнительно приписываются различные атрибуты, и где $V = \{v_i\}_{i = 1,\dots,n}$ – множество всех вершин v_i проектируемого орграфа G; $E = \{e_j\}_{j = 1,\dots,m}$ – множество всех ориентированных ребер (дуг) e_i проектируемого орграфа G.

В орграфе G каждая вершина (транспортная точка, узел, пункт) интерпретируется как остановка транспорта в некоторой ТС, а каждое ребро – как дорога соответствующей ТС, непосредственно соединяющая две транспортные точки этой ТС. При этом большинству вершин орграфа G инцидентно хотя бы одно, входящее или исходящее, ориентированное ребро пешеходной ТС (так, пешеходное сообщение, представимое парой противоположно ориентированных ребер пешеходной ТС, будет иметься между аэропортом и автобусной остановкой рядом с ним, между остановками на одной линии метро, но с составами, идущими в противоположных направлениях).

Уточним, что ТС моделируются в виде несвязных орграфов, объединение которых есть орграф G. Так, изолированным подграфом орграфа G может быть пешеходный переход между остановками или одна из линий метро такой ТС, как метрополитен, если эта ТС имеется в T (заметим, каждая линия метро есть ориентированный циклический маршрут, в котором каждое составляющие его ребро и каждая вершина встречается по разу). Ориентация учитывается, в том числе, из-за наличия в реальности однонаправленных дорог.

Также структурным элементам орграфа приписывается свой набор атрибутов. Рассмотрим несколько примеров.

Каждой вершине $v_i \in V$ соотносится:

– название/наименование (в реальности названия некоторых пунктов могут совпадать, но в графе G они будут различимы по id-номеру i);

– номер k, соответствующий ТС T_k, содержащей данную вершину в качестве остановки (то есть считается, что всякая вершина относится к какой-то только одной ТС).

Каждому ребру $e_j \in E$ соотносится:

– название/наименование (в реальности названия некоторых ребер-переездов-переходов могут совпадать, но в графе G они будут различимы по id-номеру j);

– номер k, соответствующий ТС T_k, содержащей данное ребро в качестве потенциально возможной дороги для переезда или перехода (то есть считается, что всякое ребро относится к какой-то только одной ТС);

– длина L_j ребра (для случая, если дополнительно потребуется решать задачу о пути минимальной суммарной длины);

– время D_j перемещения по ребру транспортом, соответствующим транспортной сети T_k;

– стоимость C_j перемещения по ребру транспортом, соответствующим транспортной сети T_k (для пешеходного перемещения по ребру эта стоимость нулевая).

Заметим, что итоговый граф G состоит из объединения ребер всех рассматриваемых ТС, причем каждое его ребро и каждая вершина относится только к какой-то одной из этих ТС. Исключение составляет пешеходная ТС с ребрами, соединяющими вершины, в частности, из разных ТС.

Задача о минимальном по времени пути проезда

Пусть оптимальный путь между двумя пунктами понимается в смысле минимизации суммарного времени перемещения, тогда это тривиальная задача, решаемая посредством заранее выбранного базового алгоритма. В этом случае алгоритм Дейкстры в качестве веса w_j ребра e_j графа G должен использовать времена D_j.

Задача о минимальном по стоимости пути проезда

Пусть оптимальный путь между двумя пунктами понимается в смысле минимизации суммарной стоимости перемещения по нему. Тогда:

– если за каждое перемещение между двумя смежными (соединенными ребром) вершинами даже одной транспортной сети нужно платить, то в этом случае алгоритм Дейкстры в качестве веса w_j ребра e_j графа G должен использовать стоимости C_j;

– если за перемещение между любыми, не обязательно смежными, вершинами одной транспортной сети нужно платить одну и ту же стоимость, вне зависимости от количества промежуточных вершин (лишь бы не было пересадок на транспорт иной ТС, что бывает нужно, когда пассажир старается избегать пеших переходов), то стандартный алгоритм Дейкстры модифицируем следующим образом.

Основной шаг этого алгоритма, на котором вычисляется верхняя оценка для минимальной «длины» пути в некоторую вершину графа из начальной (эта оценка равна суммарному весу ребер некоторого существующего в графе пути между указанными вершинами), будет выглядеть так.

Для каждой вершины, временно помеченной значением верхней оценки (например, помеченной числом без звездочки – указателя на минимальность) v_i, в которую потенциально возможно переместиться по ребру, ведущему из последней по порядку постоянно помеченной вершины v_k (то есть помеченной числом со звездочкой, означающим искомый минимальный суммарный вес ребер для пути в графе между указанными вершинами), попытаться уменьшить величину ее верхней оценки U_i по правилу:

$$U_i := \min\left\{U_i; U_k^* + w_{ki}\right\} \qquad (1)$$

где «:=» – оператор присвоения величине U_i нового значения по соответствующей формуле, U_k^* – последняя на текущий момент работы алгоритма постоянная пометка некоторой вершины k, а w_{ki} – вес ребра, ведущего из вершины v_k в вершину v_i, здесь равного стоимости перемещения по данному ребру).

Модификация же заключается в следующем.

Применяя формулу (1), следует проверять:

– если при рассмотрении ребра, ведущего из вершины v_k в вершину v_i, не меняется ТС, давшая постоянную пометку U_k^* (означающую минимальную стоимость попадания в вершину v_k из начальной), то w_{ki} полагать равным 0 (тем самым как раз рассматривая перемещение между очередной парой остановок без дополнительной оплаты сверх совершаемой на первой остановке очередного сегмента общего пути);

– если ТС меняется (из-за пересадки), то w_{ki} полагать равным стоимости проезда по этой очередной ТС до момента следующей пересадки на следующую ТС либо до высадки в итоговой транспортной точке.

Получается, что пометка U_i при вершине v_i теперь имеет смысл верхней оценки минимальной стоимости при перемещении из начальной вершины в вершину v_i в ситуации, когда оплата производится лишь на входе в транспорт и вне зависимости от количества проезжаемых на нем остановок. В ходе работы полученного алгоритма эти оценки требуется улучшать, то есть уменьшать.

Задача о минимизации количества пересадок

Пусть оптимальный путь при переезде от одного заданного пункта до другого понимается в смысле минимального количества пересадок (задействованных пеших переходов) между ТС. Тогда стандартный алгоритм Дейкстры модифицируем следующим образом.

Каждому ребру e_j графа G следует приписать вес W_j, равный по 0. Применяя в ходе алгоритма формулу (1), следует проверять:

– если при рассмотрении ребра, ведущего из вершины v_k в вершину v_i, ТС, давшая постоянную пометку U_k^* (означающую минимальную стоимость попадания в вершину v_k из начальной) не меняется, то в указанной формуле w_{ki} следует полагать равным 0 (то есть рассматривается перемещение без пересадки);

– если ТС меняется (из-за пересадки), то в указанной формуле w_{ki} следует полагать равным 1 (то есть количество пересадок увеличивается на единицу).

Получается, что пометка U_i при вершине v_i теперь имеет смысл верхней оценки минимального количества пересадок при перемещении из начальной вершины в вершину v_i. И в ходе работы такого модифицированного алгоритма эти оценки требуется улучшать, то есть уменьшать.

Многокритериальная задача выбора пути

Пусть при поиске пути требуется учесть несколько критериев в виде целевых функций $F_1, F_2, \dots , F_s$., примерами которых могут быть вышеуказанные задачи.

Критерии могут частично противоречить друг другу и тогда множество оптимальных решений пусто. А поскольку в реальности должно быть принято хоть какое-то решение, то оно должно быть в некотором смысле разумно и выработано, например, одним из следующих способов.

1. Использование свертки критериев в один на основе какой-либо функции $F = F(F_1, F_2, \dots , F_s)$. Если эта функция, например, аддитивна, то следует указать значимость каждого из критериев.

Для реализации такой свертки каждому ребру e_j графа G приписывается «интегральный» вес w_j, подсчитываемый по выбранной формуле свертки с аргументами, равными соответствующим значениям исходно заданных прочих весов ребра (при этом предварительно имеет смысл сделать нормировку используемых величин для их сравнимости и совместной обработки). После этого к полученному взвешенному графу применяется алгоритм поиска минимального пути (алгоритм Дейкстры).

Данный подход схематично изображен на рисунке 1.

2. Упорядочение критериев по степени их значимости. Пусть при этом упорядочении значение критерия самого значимого типа (будем говорить «первый критерий») обозначается через F_1, значение критерия второго по значимости типа (будем говорить «второй критерий») – через F_2, и т. д. В случае равнозначности каких-то критериев, следует произвольно зафиксировать какой-либо порядок их учета.

Так, если решено выбрать в качестве самого значимого критерия стоимость проезда, затем время проезда и, наконец, количество пересадок, тогда среди всех путей, одинаково лучших по стоимости, следует выделить лучшие по времени, а потом из получившегося подмножества выделить лучшие по количеству пересадок и так далее когда указанных критериев больше.

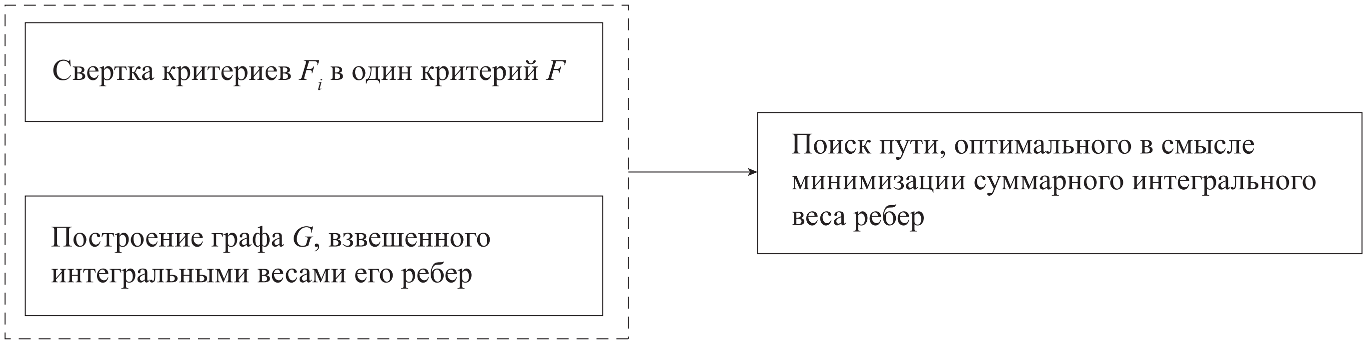
В этом случае решение задачи получается посредством алгоритма со следующими этапами.

Этап 0. Найти минимальное значение наиболее значимого критерия, используя алгоритм Дейкстры, модифицированный соответственно указанному критерию.

Этап 1. Применить алгоритм поиска множества P_1 всех таких путей, для каждого из которых достигается минимум по критерию F_1 (например, для этого можно, найдя посредством алгоритма Дейкстры минимальное значение первого критерия, далее использовать рекурсивный обход дерева допустимых путей, применяя метод ветвей и границ для отсечения неоптимальных вариантов).

Для всех указанных путей из формируемого множества P_1 (являющегося подмножеством всех допустимых путей P, $P_1 \subseteq P$), одинаково оптимальных в смысле первого критерия, подсчитывать значения критерия F_2.

Этап 2. Выделить подмножество P_2 из P_1 ($P_2 \subseteq P_1 \subseteq P$) всех таких путей, для каждого из которых до-



Составлено автором по материалам исследования

Рис. 1. Поиск решения на основе свертки критериев

стигается минимум по критерию F_2 (здесь и далее обход дерева допустимых путей уже не требуется).

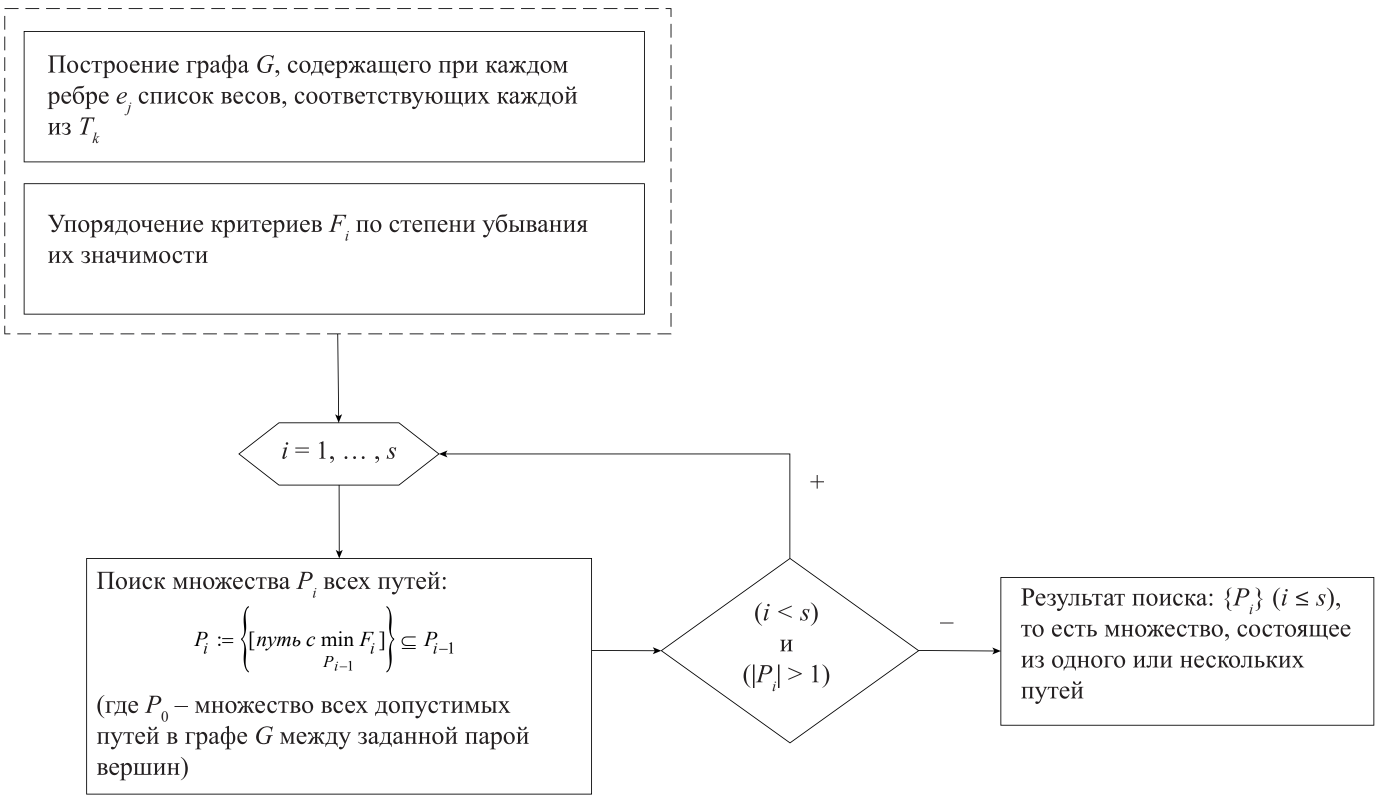
Для всех указанных путей из формируемого множества P_2 ($P_2 \subseteq P_1 \subseteq P$) подсчитывать значения критерия F_3.

Этап s. Выделить подмножество P_s из P_{s-1} ($P_s \subseteq \ldots \subseteq P_1 \subseteq P$) всех таких путей, для каждого из которых достигается минимум по критерию F_s.

Если на каком-то из этапов получается только один путь, то последующие этапы не выполняются, а для дальнейшего использования выбирается указанный единственный путь.

Если на последнем этапе получилось несколько путей, то пользователю поисковой системы предоставляются они все (для дальнейшего выбора одного на основе каких-то еще, но уже не формализованных ранее критериев).

Данный подход схематично изображен на рисунке 2.



Составлено автором по материалам исследования

Рис. 2. Поиск решения на основе упорядочения критериев

Выводы

В статье предложен комплекс мер по поиску пути в графе при нескольких критериях с оптимизирующими характеристиками однокритериального подхода, основанного на математически доказанной корректности стандартного алгоритма Дейкстры, позволяющего находить наилучшее решение за конечное количество итераций. Элемент научной новизны формируется учетом разноплановых характеристик при построении модели ТС, касающихся как объединения разнотипных ТС в одну, так и свойств этих систем, а также связанная с этим компиляция алгоритмических методов. Научно-практическая значимость работы заключается в возможности ее использования при организации, модернизации и актуализации программно-аппаратных комплексов информационных систем для нужд конечных потребителей транспортных услуг на имеющихся дорожных сетях. Востребованными направлениями дальнейших изысканий являются, в частности, вопросы учета расписаний движения пассажирского транспорта, в том числе с элементами нечеткости и стохастики.

Библиографический список

1. Вучик, В. Р. Транспорт в городах, удобных для жизни: монография. – М.: Территория будущего, 2011. – 574 с.
2. Власов, Д. Н. Транспортно-пересадочные узлы: монография. – М.: Изд-во МГСУ, 2017. – 192 с.
3. Кубил, В. Н. Исследование и разработка методов решения многокритериальных задач маршрутизации транспорта на основе муравьиного алгоритма: дисс. … канд. техн. наук: 05.13.01 / Южно-Российский государственный политехнический университет имени М. И. Платова. – Новочеркасск, 2019. – 184 с.
4. Семенов, В. В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса. – М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2004. – 38 с. (Препринт / Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша; № 34).
5. Блинкин, М. Я., Сарычев, А. В. Городской транспорт: либеральный взгляд на проблему // Полит.Ру. – 2005. – 7 декабря [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://polit.ru/article/2005/12/07/transport/ (дата обращения: 28.03.2021).
6. Миронов, В. Пассажирские хабы: мировой опыт для Москвы // РБК Недвижимость. – 2015. – 20 января [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://realty.rbc.ru/news/577d23aa9a7947a78ce91868 (дата обращения: 28.03.2021).
7. Национальный проект «Цифровая экономика РФ» // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/ (дата обращения: 28.03.2021).
8. Проект цифровизации городского хозяйства «Умный город» // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://minstroyrf.gov.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyy-gorod/ (дата обращения: 28.03.2021).
9. Реестр проектов, категория «Транспорт» // Национальный проект «Умный город» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://russiasmartcity.ru/projects?category=transport (дата обращения: 28.03.2021).
10. Рузманова, Ю. Not smart yet: Чему нам надо учиться у самых умных городов мира // Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» – 2018. – 25 декабря [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://digital.ac.gov.ru/news/644/?sphrase_id=133429 (дата обращения: 28.03.2021).
11. Abraham, I., Delling, D., Goldberg, A. V., Werneck, R. F. A hub-based labeling algorithm for shortest paths in road networks // Experimental Algorithms. SEA 2011. Lecture Notes in Computer Science, V. 6630. / Edited by P. M. Pardalos, S. Rebennack. – Berlin: Springer, Heidelberg, 2011. – Pp. 230–241. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20662-7_20
12. Aljubayrin, S. Algorithms for advanced path optimization problems: Doctoral Thesis. – University of Melbourne, 2016. – 1974 p.
13. Braess, D., Nagurney, A., Wakolbinger, T. On a paradox of traffic planning // Transportation Science. – 2005. – V. 39, No. 4. – Pp. 444–450. https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0127
14. Dantzig, G. B. On the shortest route through a network // Management Science. – 1960. – V. 6, No. 2. – Pp. 187–190. https://doi.org/10.1287/mnsc.6.2.187
15. Dijkstra, E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. – 1959. – No. 1. – Pp. 269–271. https://doi.org/10.1007/BF01386390
16. Galton, F. On the construction of isochronic passage-charts // Proceedings of the Royal Geographical Society. – 1881. – V. 3, No. 11. – Pp. 657–658.
17. Ni, D. Traffic flow theory: characteristics, experimental methods, and numerical techniques. –Butterworth-Heinemann, 2015. – 412 p.

References

1. Vuchik V. R. *Transportation for livable cities: monograph*, Moscow, Territoriya budushchego, 2011, 574 p. (In Russian).
2. Vlasov D. N. *Transport and transfer hubs: monograph*, Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publishing House, 2017, 192 p. (In Russian).
3. Kubil V. N. *Research and development of methods for solving multi-criteria transport routing problems based on the ant algorithm*: Dissertation of Candidate of Technical Sciences: 05.13.01, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, 2019, 184 p. (In Russian).
4. Semenov V. V. *Mathematical modelling of transport stream dynamics of megacities*, Moscow, Keldysh Institute of Applied Mathematics, 2004, 38 p. (Preprint, Keldysh Institute of Applied Mathematics, No. 34). (In Russian).
5. Blinkin M. Ya., Sarychev A. V. Urban transport: a liberal view of the problem, *Polit.Ru*, 2005, December 7. Available at: https://polit.ru/article/2005/12/07/transport/ (accessed 28.03.2021). (In Russian).
6. Mironov V. Passenger hubs: world experience for Moscow, *RBC-Nedvizhimost`*, 2015, January 20. Available at: https://realty.rbc.ru/news/577d23aa9a7947a78ce91868 (accessed 28.03.2021). (In Russian).
7. National Project "Digital Economy of the Russian Federation", *Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation*, 2021. Available at: https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/ (accessed 28.03.2021). (In Russian).
8. The Project of Digitalization of the Urban Economy "Smart City", *Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation*, 2021. Available at: https://minstroyrf.gov.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyy-gorod/ (accessed 28.03.2021). (In Russian).
9. Project Register, "Transport category", *National Project "Smart City"*, 2021. Available at: https://russiasmartcity.ru/projects?-category=transport (accessed 28.03.2021). (In Russian).
10. Ruzmanova Yu. Not smart yet: What we need to learn from the smartest cities in the world, *National Program "Digital Economy of the Russian Federation"*, 2021. Available at: https://digital.ac.gov.ru/news/644/?sphrase_id=133429 (accessed 28.03.2021). (In Russian).
11. Abraham I., Delling D., Goldberg A. V., Werneck R. F. A hub-based labeling algorithm for shortest paths in road networks, *Experimental Algorithms. SEA 2011. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6630, Edited by P. M. Pardalos, S. Rebennack, Berlin, Springer, Heidelberg 2011, pp. 230–241. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20662-7_20
12. Aljubayrin S. *Algorithms for advanced path Optimization problems. Doctoral Thesis*, University of Melbourne, 2016, 1974 p.
13. Braess D., Nagurney A., Wakolbinger T. On a paradox of traffic planning, *Transportation Science*, 2005, vol. 39, no. 4, pp. 444–450. https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0127
14. Dantzig G. On the shortest route through a network, *Management Science*, 1960, vol. 6, no. 2, pp. 187–190. https://doi.org/10.1287/mnsc.6.2.187
15. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1959, no. 1, pp. 269–271. https://doi.org/10.1007/BF01386390
16. Galton F. On the construction of isochronic passage-charts, *Proceedings of the Royal Geographical Society*, 1881, vol. 3, no. 11, pp. 657–658.
17. Ni D. *Traffic flow theory: characteristics, experimental methods, and numerical techniques*, Butterworth-Heinemann, 2015, 412 p.