

УДК 656.025.4

## Модель региональной транспортной сети для построения рациональных мультимодальных маршрутов пассажирских перевозок

В. В. Костенко, В. А. Голубцов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Костенко В. В., Голубцов В. А. Модель региональной транспортной сети для построения рациональных мультимодальных маршрутов пассажирских перевозок // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 158-172. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-158-172

### Аннотация

**Цель:** Адаптация методов построения моделей транспортных сетей для разработки рациональных мультимодальных маршрутов региональных пассажирских перевозок, а также создание программного продукта для практической реализации предлагаемых алгоритмов. **Методы:** Математическое моделирование; теория графов для решения региональных транспортных задач с построением двухуровневых ориентированных взвешенных мультиграфов; анализ существующих алгоритмов для оптимизации поиска решений графов; алгоритм Дейкстры. **Результаты:** Модель региональной пассажирской транспортной сети реализована в виде разработанной авторами расчетной программы, в которой исходными данными служили расписание движения всех рассматриваемых видов транспорта между учитываемыми узловыми точками, а результатом — построение рациональных мультимодальных маршрутов. Расчетная программа составлена из нескольких модулей, реализующих в общем виде следующий функционал: считывание исходных данных из файлов; формирование массива связей для рассматриваемых проблем; поиск рационального решения и вывод полученных данных с сохранением в файл. Критерием оптимизации при выборе маршрута может служить минимальное время поездки, расстояние или стоимость поездки в зависимости от поставленной задачи и введенных исходных данных. Полученный массив данных с результатами в дальнейшем анализировался с использованием табличного редактора *MS Excel*. Такой подход был выбран по причине достаточной гибкости при выполнении разнообразного анализа данных и удобства графического представления результатов. **Практическая значимость:** Разработка рациональных мультимодальных маршрутов, актуальная в первую очередь для случаев скачкообразных изменений транспортных связей, при которых методы экстраполяции существующих пассажиропотоков не позволяют получить достоверные прогнозные данные. Обоснование корректировки расписаний региональных пассажирских маршрутов по результатам анализа востребованности и загруженности их конкретных сегментов.

**Ключевые слова:** Мультимодальный маршрут, пассажирская перевозка, региональная транспортная сеть, региональный транспорт, теория графов, математическая модель.

### Объект исследования

Пассажирские транспортные сети любого уровня, как правило, крайне инерционны. Они формируются в течение длительного периода времени и медленно эволюционируют под влиянием различных и часто противоречивых тенденций

и ограничений, адаптируясь к экономическим, социальным, градостроительным, природно-климатическим и другим изменениям. В подобных условиях предпочтения пассажиров достаточно хорошо прогнозируются на годы вперед на основе экстраполяции существующих и реализованных пассажиропотоков.

Однако в этой эволюционной ситуации в последнее время наблюдается довольно много исключений, когда методы экстраполяции плохо работают: это случаи скачкообразных изменений, ломающих старые логистические схемы. Например, при изменении административных и государственных границ или при создании уникальных транспортных объектов. В Европе к наиболее ярким событиям, вызвавшим единовременное изменение региональных пассажиропотоков по политическим причинам, можно отнести падение Берлинской стены и объединение Германии, распад Советского Союза и разделение Югославии, создание Европейского союза и Шенгенской зоны свободных передвижений. Примеры особо значимых транспортных объектов, изменивших потоки внутри регионов и в точках входа-выхода, — тоннель под Ла-Маншем, Московское центральное кольцо, Крымский мост, европейские высокоскоростные железнодорожные магистрали, раздвигающие границы агломераций и объединяющие провинции.

Исследование, описанное в настоящей статье, выполнено для подобных случаев развития региональных транспортных сетей, в которых пассажир, с одной стороны, имеет выбор между видами транспорта, их маршрутами и точками пересадок (узлами сети), а с другой — этот выбор не очевиден перевозчикам из-за упомянутых выше изменений [1, 2]. Рассматриваемая модель собрана на основании данных конкретного российского региона — Республики Крым в рамках исследований [3], осуществленных в Петербургском университете путей сообщения за счет средств федерального бюджета, но при этом она может быть легко тиражируема, так как при уникальности каждой транспортной сети составляющие их элементы универсальны.

Решения, реализуемые в рамках рассматриваемых задач моделирования перевозочного процесса, позволят наметить возможные способы ускорения существующих транспортных связей, добавлять новые или исключать неиспользуемые и малоиспользуемые существующие транспортные узлы. Такие манипуляции с моделью транспортной сети приведут к появлению новых связей и исключению незадействованных, что делает модель динамически изменяемой. Подобный подход в моделировании вносит необходимость обновления целого ряда используемых данных в режиме реального времени, что в некоторых случаях может быть затруднительно, поскольку, в свою очередь, такие сведения не могут быть получены одномоментно и требуют предварительных исследований и расчетов. К таким сведениям можно отнести перспективные графики движения и времена хода на железнодорожном транспорте, получить которые можно только после выполнения моделирования движения поездов (тяговых расчетов) и разработки

ТАБЛИЦА 1. Форма представления расписаний движения видов транспорта между узловыми точками

Название узла	Транспорт	Маршрут	Рейс	Пересадка на транспорт	Прибытие	Стоянка/пересадка	Отправление
Керчь	Поезд	Керчь — Джанкой	6746				8:35
Владиславовка	Поезд	Керчь — Джанкой	6746		10:55	25	11:20
Джанкой	Поезд	Керчь — Джанкой	6746		13:10		
Джанкой	Поезд			Автобус		40	

данных графиков. Однако даже при наличии определенных ограничений и допущений моделирование мультимодальных перевозок позволяет выделить наиболее загруженные (востребованные) участки транспортной сети, издержки, связанные с пересадками, достижимость отдельных узлов в определенное время суток, наиболее востребованные виды транспорта на планируемых маршрутах.

Рассматриваемые модели позволят строить наиболее рациональные мультимодальные маршруты пассажирских перевозок между заданными точками, представляющие собой, как правило, точки тяготения пассажиров — пассажирообразующие, поглощающие и перераспределяющие. К таким точкам в случае Республики Крым отнесены точки входа в транспортную сеть региона и выхода из нее, курортные зоны и транспортные пересадочные узлы — далее все эти точки будут называться узловыми точками.

В разрабатываемой модели, в целях обеспечения связей между узловыми точками, рассматриваются следующие основные виды пассажирского транспорта общего пользования: автодорожный, железнодорожный и воздушный. В соответствии с видом связей между узлами в модели используются следующие виды транспортных средств: региональный и межрегиональный железнодорожный транспорт (рельсовые автобусы, электропоезда, поезда дальнего следования), региональный автотранспорт (автобусы, троллейбусы, маршрутные такси), межрегиональный воздушный транспорт.

Для решения поставленных задач точность моделирования перевозочного процесса требует учета даты и времени начала поездок, конкретных расписаний на определенную дату. Поэтому в качестве исходных данных в модели используется актуальное, на момент разработки и использования модели, расписание движения, учитываемого в работе общественного транспорта, по видам и маршрутам во всех узловых точках, а также время, затрачиваемое на пересадку между различными видами транспорта. Кроме этого, учет расписания в явном виде позволяет провести оценку времени на ожидание транспортного средства. В этом времени учитывается в том числе запас на компенсацию возможных опозданий регионального

транспорта. Все это дает возможность провести корректировку расписания для улучшения согласованности между различными видами транспорта. Информация об актуальном расписании получена из открытых источников и представляется для вычислений в программе в табличном виде. Пример приведен в табл. 1.

В модели учитывается расписание движения в рамках одних календарных суток от начального времени движения (т. е. фактически максимально двое суток), что достаточно для проезда по рассматриваемой территории с учетом всех вариантов пересадок.

Кроме расписания движения, которое используется для всех рассматриваемых вариантов, для моделирования каждого конкретного мультимодального маршрута задается следующая исходная информация: начальная и конечная узловые точки, начальный (возможно и конечный) вид транспорта, начальное время возможного отправления. Эти данные могут задаваться одним массивом со всеми интересующими вариациями переменных.

## Решения

Рассматриваемая задача создания модели структуры и работы транспортно-логистической сети относится к типовым из теории графов [4], поэтому для ее решения был использован соответствующий инструментарий. Формируемый граф предполагает наличие нескольких связей между смежными узлами — каждая связь определяет тот или иной вид транспорта, на котором можно перемещаться между рассматриваемыми узлами. При этом учитывается, что направление движения может быть двусторонним, а количество связывающих узлы видов транспорта между различными узлами графа может различаться. Такую схему можно отнести к ориентированным мультиграфам [5], поскольку каждая связь, определяющая вид транспорта, соединяет узлы в определенном направлении (ребра с собственной идентификацией). Кроме этого, граф является взвешенным, поскольку в характеристиках связей учитываются не только соединяемые узлы, но и их вес (время, стоимость, расстояние или иной параметр), при этом весовая характеристика связи, в зависимости от направления, может меняться (например, время движения «туда» и «обратно» может различаться). Заметим здесь, что при формировании и изменении маршрутных сетей финансовые показатели обычно выступают в виде ограничений [6, 7], а критерием эффективности является минимизация времени доставки и максимальный комфорт пассажиров на выбранном маршруте. Комфорт, в свою очередь, формализуется количеством и удобством пересадок, а также продолжительностью сегментов поездок на местных транспортных средствах, уступающих в условиях проезда транспорту магистральному. Например, проезд сегмента маршрута на пригородном автобусе менее комфортен, чем на поезде со спальными местами.

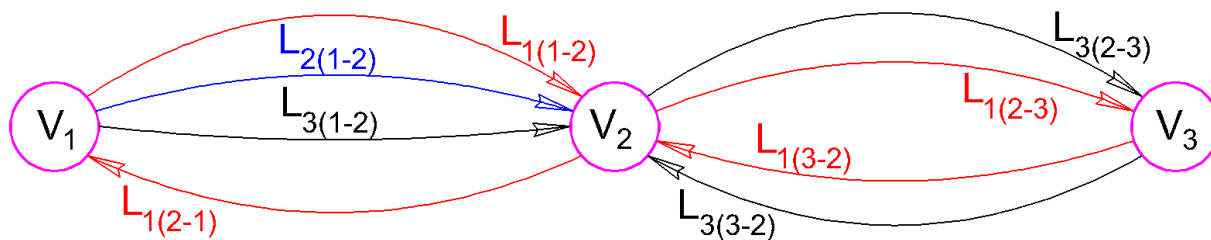


Рис. 1. Ориентированный мультиграф:  
цвет связи определяет вид транспорта;  $L_{1(1-2)}$  — связь видом транспорта 1 между узлами первым и вторым в соответствующем направлении;  $V_1$  — определенный узел

Требуемые графы могут быть представлены классической формулой:

$$G = (V, L, i, j),$$

где  $V$  — множество вершин графа;

$L$  — множество связей, соединяющих вершины;

$i$  — определяет для каждой связи начальную вершину;

$j$  — определяет для каждой связи конечную вершину.

Рассматриваемый ориентированный мультиграф показан на рис. 1.

В представленном на рис. 1 примере показаны попарные связи между узлами  $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$ . Между первыми двумя узлами существуют три связи, представляющие различные виды транспорта (определенный цвет соответствует конкретному виду транспорта) — от первого ко второму, и только одна связь в обратном направлении. Между вторым и третьим узлами реализованы по две связи в каждом направлении и используются только два вида транспорта.

Вес связи — в данном примере это время на перемещение между узловыми точками — может быть определен по формуле:

$$T_{ij} = t_j - t_i, \text{ мин}$$

где  $t_j$  — время прибытия транспорта в целевой узел;

$t_i$  — время отправления транспорта из предыдущего узла.

Эти времена принимаются из условия неизменности вида транспорта, маршрута и рейса согласно базе с расписанием.

Однако, поскольку при моделировании перевозочного процесса предусматриваются пересадки между рассматриваемыми видами транспорта и маршрутами, каждый узел в сети будет представлять собой дополнительный, внутренний граф (рис. 2), который должен быть также учтен при построении мультимодального маршрута.

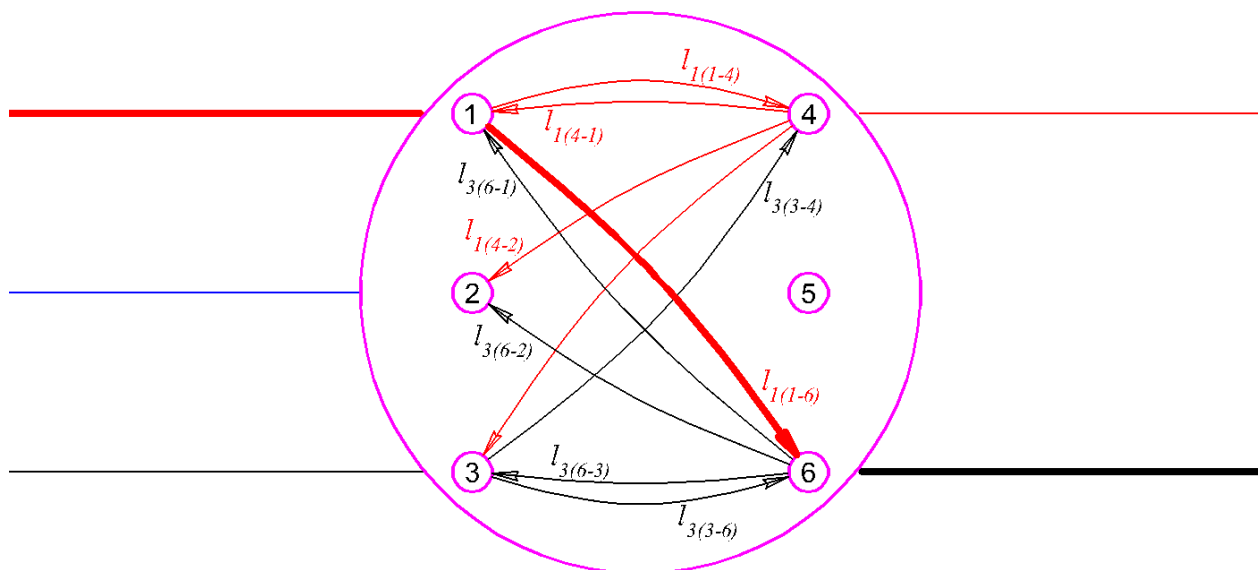


Рис. 2. Граф в узле, определяющий возможные пересадки (цветом определяются виды транспорта, утолщенной линией — выбранный маршрут с учетом пересадки)

Данный граф приводит пример возможных пересадок между видами транспорта, пересекающимися в узловой точке. Связи графа имеют веса, которые могут выражать интересующие сущности, например время, затрачиваемое на пересадку или остановку транспорта в определенном пункте, или расстояние, которое может потребоваться преодолеть для осуществления пересадки, или приведенную стоимость потерь времени пассажира. Графы в узловых точках учитывают не только виды транспорта, между которыми возможны пересадки, но и направление пересадок. Это необходимо, поскольку веса связей по направлениям движения могут отличаться, что вызвано особенностями правил, регламентирующих допуск и посадку пассажиров на транспорт. Например, пересадка с автобуса на поезд требует гораздо больше времени по сравнению с обратным направлением, что связано с наличием досмотровых мероприятий и другими повышенными мерами обеспечения безопасности. Кроме этого, учитывается тот факт, что в ряде случаев дальнейшее движение на выбранном транспортном средстве невозможно. Подобное ограничение появляется, когда рассматриваемый узел является конечным для транспорта и его дальнейшее движение не предусмотрено. Так на представленном графе (рис. 2) отсутствует связь с точкой № 5, поскольку движение транспорта, обозначенного синим цветом, до следующего узла не предполагается.

Полученный внутриузловой граф может быть классифицирован как двудольный граф (или биграф) [8], то есть это граф, узлы которого разделены на две группы таким образом, что узлы одной группы ( $A$ ) соединяются связями только с узлами другой группы ( $B$ ) и не имеют связей внутри групп (рис. 3).



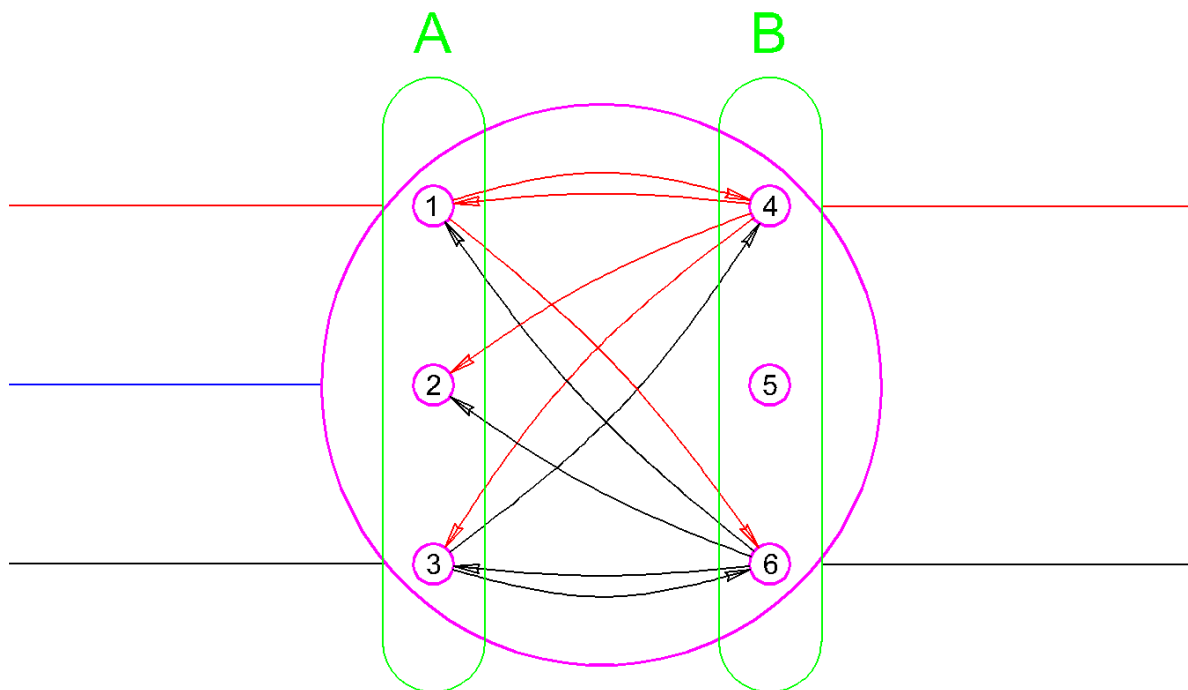


Рис. 3. Двудольный граф (биграф)

В созданной модели двудольные графы, расположенные внутри узлов, могут обладать следующими свойствами:

- взвешенный граф — все связи характеризуются весами;
- граф может быть полным двудольным — все вершины одной группы соединены со всеми вершинами другой группы, то есть для каждой пары вершин  $a \in A$  и  $b \in B$  существует связь  $(a, b) \in l$  для  $|A| = i$ ,  $|B| = j$ ;
- мультиграф — узлы могут соединяться несколькими связями (направления движения и виды транспорта).

В итоге внутриузловые графы являются взвешенными полными или неполными двудольными мультиграфами.

Рассматриваемая транспортная сеть, которая использовалась для моделирования процесса перевозок, представляет собой двухуровневый ориентированный мультиграф, связи которого по своему функциональному назначению делятся следующим образом:

- перемещение между узлами;
- остановка транспорта;
- ожидание транспорта на остановочном пункте;
- переход между остановочными пунктами.

Последние три связи реализуются во внутриузловом графе.

Алгоритмов, предназначенных для решения графов (поиска кратчайших путей), достаточно много. К наиболее распространенным можно отнести следующие алгоритмы: Дейкстры, Флойда — Уоршелла, Беллмана — Форда, Джонсона,

Левита, алгоритм поиска  $A^*$  и другие [9, 10]. Для реализации в проводимом исследовании были рассмотрены следующие алгоритмы:

– алгоритм Дейкстры [11] — это алгоритм для нахождения кратчайшего расстояния от указанной вершины графа до всех остальных. Алгоритм предназначен для работы только с графами, не имеющими отрицательных связей. Это наиболее распространенный метод, но с достаточно высокой сложностью (время работы алгоритма зависит от длины пути) [9, 12]:  $O(n^2 + m)$ , где  $n$  — количество узлов,  $m$  — количество связей;

– алгоритм Беллмана — Форда — в отличие от алгоритма Дейкстры, может работать со связями, имеющими отрицательные веса, которые в проводимом исследовании отсутствовали;

– алгоритм Флойда — Уоршелла — динамический алгоритм, предназначенный для нахождения кратчайших расстояний между всеми вершинами взвешенного ориентированного графа, но не сохраняющий информацию о кратчайших путях;

– алгоритм Левита — отличается от алгоритма Дейкстры необходимостью повторной обработки узлов графа, что можно отнести к недостаткам;

– алгоритм  $A^*$  — алгоритм поиска, который находит во взвешенном графе маршрут наименьшего веса от начального узла до выбранного конечного. Порядок поиска кратчайшего пути требует проведения эвристической оценки.

В итоге по совокупности условий подходящим выбором из перечня кратко описанных алгоритмов по своим характеристикам принят алгоритм Дейкстры: решение взвешенных графов, отсутствие связей с отрицательным весом (не используются), сохранение информации о кратчайших путях (необходимо получить последовательность узлов пути). В дополнение к указанному — выбранный алгоритм является единственным, который при соответствующей его модификации позволяет работать с динамически изменяемым весом связей, вычисляемых в процессе его работы.

## Результаты

Модель перевозочного процесса была реализована в виде расчетной программы [13], в которой исходными данными служили расписание движения всех рассматриваемых видов транспорта между учитываемыми узловыми точками. Схема с размещением части таких точек представлена на рис. 4.

Кроме узловых точек исходными данными являлись «проблемы», сформулированные в табличном виде и приведенные в табл. 2.

Отдельная «проблема» представляет собой задание на решение маршрута мультимодальной перевозки: определяет начальную точку — остановочный пункт определенного вида транспорта и суточное время отсчета начала поездки, целевой узел и, при необходимости, вид транспорта в целевом узле, на котором



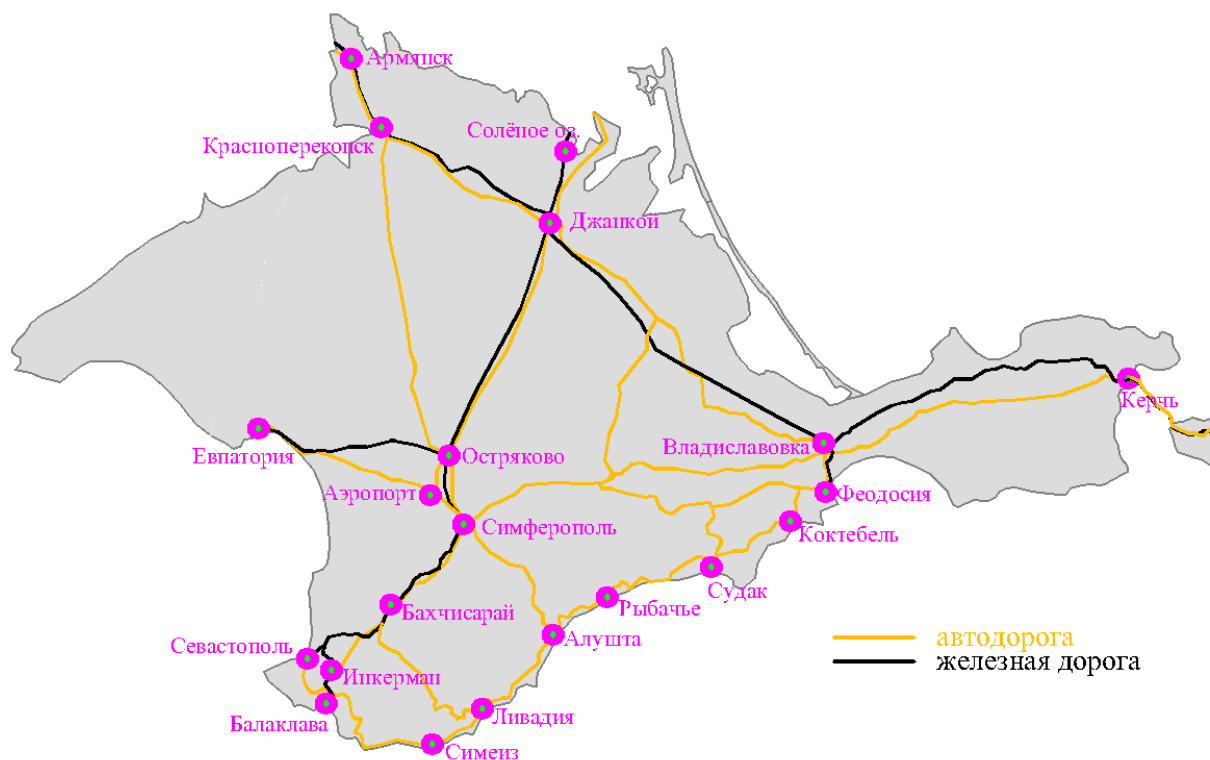


Рис. 4. Узловые точки, учтенные в модели регионального транспортного обслуживания пассажиров на территории Крыма

ТАБЛИЦА 2. Форма представления «проблем»

№ проблемы	Начальное время	Начальный узел	Начальный транспорт	Конечный узел	Конечный транспорт
1	8:30	Керчь	Поезд	Евпатория	
2	7:00	Феодосия	Поезд	Севастополь	Автобус

предполагается дальнейшее движение. Последнее условие необходимо для уточнения весовой характеристики получаемого пути в целом, с учетом перехода на конечный остановочный пункт со сменой вида транспорта. Например, после приезда в аэропорт на автобусе до времени вылета по расписанию необходимо иметь время на переход в здание аэропорта, регистрацию, сдачу багажа, предполетный досмотр и запас на возможное опоздание автобуса.

Расчетная программа [13] составлена из нескольких модулей, реализующих в общем виде следующий функционал: считывание данных из файлов, содержащих расписание движения всех видов транспорта и «проблемы», формирование массива связей для рассматриваемой проблемы, поиск решения и вывод полученных данных с сохранением в файл.

Основную практическую сложность при создании расчетной программы представляли затраты времени на вычисления, которые прежде всего определил

алгоритм этапа формирования перечня всех связей для дальнейшего поиска кратчайших путей по заданиям, описанным в таблице проблем (табл. 2), поскольку для получения всего перечня связей без исключения требуется неоднократный просмотр всего массива данных, содержащих расписание, и в случае увеличения объема растет и затрачиваемое время.

Как известно, связь на графе формируется парой узлов. Однако формат хранения расписания не отражает в явном виде истинного количества узлов, что хорошо видно на примере строки, описывающей пересадку со сменой вида транспорта, т. е. переход на другой остановочный пункт (4-я строка в табл. 1). Данная запись только участвует в формировании связей, реализующих пересадку с одного вида транспорта на другой, совокупная численность которых будет зависеть от количества прибытий на остановочный пункт отдельного вида транспорта. Другие строки в таблице также участвовали в формировании от одной до двух связей.

Решение проблемы длительности обработки исходных материалов видится такими путями, как, например, однократная обработка данных с расписаниями и получение всех возможных вариантов связей, что может занять значительное количество времени, но в дальнейшем, в случае изменения, удаления или добавления новых данных, потребуется выполнить обработку только вносимых данных. Другой вариант заключается в формировании связей на этапе поиска решений на графе, что потребует использования модифицированного алгоритма, но позволит исключить бросовые работы по формированию массива всех возможных связей, включающих в том числе связи, которые не будут нигде задействованы. Этот подход также пригоден для задач с динамически изменяющимися весами связей, не требует предварительного создания массива связей, что упрощает внесение изменений в базу с расписанием или иными данными.

В проведенном исследовании упомянутая проблема решалась путем формирования на основе исходных данных сортированного массива с полным перечнем узлов, что позволило в дальнейшем при создании связей исключить повторное чтение узлов. Кроме этого, логически отбрасывались узлы, не удовлетворяющие требованиям формирования связей, что также сокращало время работы. Однако такой подход применим к небольшим объемам исходных данных, а с их ростом его использование не приведет к ощутимому сокращению затрат времени на обработку.

Разработанная модель, при необходимости, может быть модифицирована, что позволит исключать из рассмотрения определенные узловые точки и отдельные виды транспорта, тем самым сужая возможности поиска решений в рассматриваемых вариантах, также возможно выполнять расчет «с конца», т. е., например, такой расчет характерен для задач, сформулированных следующим образом: в какое время необходимо выйти из дома, чтобы достичь цели к определенному моменту (например, не опоздать на поезд или самолет в конце рассматриваемого мультимодального маршрута). В настоящем исследовании приведенные

ТАБЛИЦА 3. Формат результатов работы расчетной программы

1	узел А	узел А	узел Б	узел Б	узел Б	узел В	...
1		поезд	поезд	поезд	автобус	автобус	
1		п10	п10		25	25	
1		6742	6742		8	8	
1	8:00	8:30	9:15	9:50	10:05	10:35	
...							

*Примечание.* В первой колонке приводится номер проблемы, далее построчно: в первой строке — название узла, во второй — вид транспортного средства, в третьей — маршрут, в четвертой — рейс и в пятой строке — модельное время.

дополнительные условия не использовались и поэтому не были реализованы в расчетной программе.

Результат работы созданной расчетной программы представляет собой массив данных, в котором по каждой проблеме приводится информация о достижимости заданных узлов, а также подробно расписанные кратчайшие пути с указанием всех пересадок, ожиданий, смены транспорта и прочая информация. Также в результатах представлены весовые характеристики для всех выводимых связей. Пример результатов представлен в табл. 3.

Полученный массив данных с результатами в дальнейшем анализировался с использованием табличного редактора *Microsoft Excel*. Такой подход был выбран по причине достаточной гибкости при выполнении разнообразного анализа данных и удобства графического представления результатов.

Таким образом, обработка исходных данных состоит из двух блоков: расчетного, представленного отдельной расчетной программой [13], и аналитического, реализованного на базе табличного редактора *MS Excel*.

Интерфейс расчетного блока позволяет интерактивно выбрать файл, содержащий данные с расписанием движения рассматриваемых видов транспорта, файл со списком проблем, а также запустить выполнение расчета, после завершения которого создается файл с результатами.

Интерфейс аналитического блока — окно программы *MS Excel* для анализа данных, выводит информацию о построенных маршрутах, а также в отдельном окне позволяет вводить дополнительные сведения для конкретизации запросов, связанных с исследованием.

## Заключение

Выполненное исследование позволяет количественно оценить степень существующей несогласованности в расписании различных видов регионального и городского транспорта с расписанием магистрального железнодорожного

транспорта, что приводит к дополнительным потерям общего времени в течение поездки, которое может достигать нескольких часов. Предложенное в качестве практического результата исследования согласование расписаний поездов дальнего следования с региональными автобусами на маршруте Феодосия — Владиславовка — Алушта — Ялта позволит сократить временные издержки, что скажется на привлекательности и удобстве пользования железнодорожным транспортом, а также облегчит планирование поездок.

Экономической оценке потерь времени пассажиров на проезд в настоящее время уделяется очень мало внимания, и никто не может с приемлемой точностью привести подобные данные. На наш взгляд, подобные исследования должны однозначно проводиться при составлении и согласовании расписаний движения общественного транспорта разных уровней — местного, регионального и магистрального.

## Библиографический список

1. Дорофеевский С. А. Эффективные параметры комплексной технологии транспортного узла / С. А. Дорофеевский, А. Н. Иванков, В. В. Костенко // Железнодорожный транспорт. — 2015. — № 4. — С. 49–53.
2. Binder S. The multi-objective railway timetable rescheduling problem / S. Binder, Y. Maknoon, M. Bierlaire // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — Vol. 78. — Pp. 78–94. — DOI: 10.1016/j.trc.2017.02.001.
3. Kostenko V. V. Optimization of regional transport networks based on a mathematical model of passenger preferences / V. V. Kostenko, V. A. Golubtsov, R. V. Pank et al. // Journal of Physics Conference Series. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032101
4. Zhuravleva N. Mathematical description and modelling of transportation of cargoes on the base digital railway / N. Zhuravleva, I. Guliy, M. Polyanichko // Vide. Tehnologija. Resursi — Environment, Technology, Resources, Rezekne, June 20–22, 2019. — Rezekne: Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, 2019. — Pp. 175–179. — DOI: 10.17770/etr2019vol2.4049.
5. Harary F. Graph Theory. — Reprint 2013. Narosa Publishing House. — P. 298.
6. Egorov Y. The level of railway rates as a factor of sustainable development of territories (Conference Paper) / Y. Egorov, N. Zhuravleva, M. Poliak // 1st Conference on Sustainable Development: Industrial Future of Territories, IFT 2020; Ural State University of Economics Yekaterinburg; Russian Federation; 28 September 2020 to 29 September 2020. — 2020. — Vol. 208.
7. Kotenko A. Analysis of the experience of operation and scope of application of direct connections to ensure passenger transportation on regional lines / A. Kotenko, T. Malakhova, T. Shchmanev // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. — Vol. 49. — Pp. 363–372. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1\_37.
8. Bollobás B. Modern Graph Theory / B. Bollobás. — 2nd printing 2002. Graduate Texts in Mathematics. 184. Springer Publ. — 394 p. — DOI: 10.1007/978-1-4612-0619-4.

9. Cormen T. H. Introduction to Algorithms / T. H. Cormen, Ch. E. Leiserson, L. Rivest et al. — MIT Press, 2009.
10. Stuart J. Russel and Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach // J. Stuart. — Prentice Hall Publ., 2020.
11. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. — Springer Publ., 1959. — Vol. 1. — Iss. 1. — Pp. 269–271. — DOI: 10.1007/BF01386390
12. Fredman M. L. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms / M. L. Fredman, R. E. Tarjan // J. ACM. — 1987. — Vol. 34. — Iss. 3. — Pp. 596–615.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664574 Российская Федерация. Маршрут — программа построения транспортного маршрута по заданному критерию оптимизации: № 2023663295: заявл. 19.06.2023: опубл. 05.07.2023 / В. А. Голубцов, В. В. Костенко; заявитель аедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Дата поступления: 01.09.2023

Решение о публикации: 01.10.2023

#### **Контактная информация:**

КОСТЕНКО Владимир Васильевич — канд. техн наук, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы»; docentkostenko@yandex.ru

ГОЛУБЦОВ Владимир Анатольевич — ст. преподаватель кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; kipjd@mail.ru

## **A Model of the Regional Transport Network for Constructing Rational Multimodal Passenger Traffic Routes**

**V. V. Kostenko, V. A. Golubtsov**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Kostenko V. V., Golubtsov V. A. A Model of the Regional Transport Network for Constructing Rational Multimodal Passenger Traffic Routes. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 158-172. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-158-172

### **Summary**

**Purpose:** Adaptation of methods of constructing models of transport networks for the development of rational multimodal routes of regional passenger transportation, as well as the creation of a software product for the practical implementation of the proposed algorithms. **Methods:** Mathematical modeling; graph theory for solving regional transportation problems with construction of two-level oriented weighted multigraphs; Analysis of existing algorithms for optimizing the search for graph solutions; Dijkstra's algorithm. **Results:** The model of the regional passenger transport network has been implemented in the form of a calculation

program developed by the authors. In this program, the schedule of the movement of all transport points under consideration is the initial data, and the result is the construction of rational multimodal routes. The calculation program is compiled from several modules that implement the following functionality in general: reading input data from files; the formation of an array of connections for the problems under consideration; search for a rational solution and output of the received data while saving it to the file. The optimization criterion when choosing a route can be the minimum travel time, distance, or cost of the trip, depending on the task and input data provided. The resulting array of data with the results has been further analyzed using the MS Excel table editor. This approach is selected due to sufficient flexibility when performing a variety of data analysis and the convenience of graphic presentation of the results. **Practical significance:** The development of rational multimodal routes, relevant primarily for cases of abrupt changes in transport relations, in which the extrapolation methods of existing passenger flow do not provide reliable forecast data. Justification of the adjustment of the schedules of regional passenger routes based on the results of the analysis of the demand and the load of their specific segments.

**Keywords:** Multimodal route, passenger transportation, regional transport network, regional transport, graph theory, mathematical model.

## References

1. Dorofeevskiy S. A., Ivankov A. N., Kostenko V. V. Effektivnye parametry kompleksnoy tekhnologii transportnogo uzla [Effective parameters of complex technology of a transport hub]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2015, Iss. 4, pp. 49–53. (In Russian)
2. Binder S., Maknoon Y., Bierlaire M. The multi-objective railway timetable rescheduling problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 78, pp. 78–94. DOI: 10.1016/j.trc.2017.02.001.
3. Kostenko V. V., Golubtsov V. A., Pank R. V. et al. Optimization of regional transport networks based on a mathematical model of passenger preferences. *Journal of Physics Conference Series*. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032101
4. Zhuravleva N., Guliy I., Polyanichko M. Mathematical description and modelling of transportation of cargoes on the base digital railway. *Vide. Tehnologija. Resursi — Environment, Technology, Resources, Rezekne*, June 20–22, 2019. *Rezekne: Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija*, 2019, pp. 175–179. DOI: 10.17770/etr2019vol2.4049.
5. Harary F. *Graph Theory*. Reprint 2013. Narosa Publishing House, p. 298.
6. Egorov Y., Zhuravleva N., Poliak M. The level of railway rates as a factor of sustainable development of territories (Conference Paper). 1st Conference on Sustainable Development: Industrial Future of Territories, IFT 2020; Ural State University of Economics Yekaterinburg; Russian Federation; 28 September 2020 to 29 September 2020, vol. 208.
7. Kotenko A., Malakhova T., Shchmanev T. Analysis of the experience of operation and scope of application of direct connections to ensure passenger transportation on regional lines. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, vol. 49, pp. 363–372. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1\_37.
8. Bollobás B. *Modern Graph Theory*. 2nd printing 2002. Graduate Texts in Mathematics. 184. Springer Publ, 394 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0619-4.
9. Cormen T. H., Leiserson Ch. E., Rivest L. et al. *Introduction to Algorithms*. MIT Press, 2009.



10. Stuart J. Russel and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. J. Prentice Hall Publ., 2020.
11. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. — Springer Publ., 1959, vol. 1, Iss. 1, pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390
12. Fredman M. L., Tarjan R. E. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. *J. ACM*, 1987, vol. 34, Iss. 3, pp. 596–615.
13. Golubtsov V. A., Kostenko V. V. *Marshrut — programma postroeniya transportnogo marshruta po zadannomu kriteriyu optimizatsii* [Route — a program for constructing a transport route according to a given optimization criterion]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2023663295. (In Russian)

Received: September 01, 2023

Accepted: October 01, 2023

**Author's information:**

Vladimir V. KOSTENKO — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Railway Stations and Hubs”; docentkostenko@yandex.ru.

Vladimir A. GOLUBTSOV — Senior Lecturer of the Department “Surveys and Design of Railways”; kipjd@mail.ru.