

---

---

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

---

---

УДК 512.64, 519.237, 656.022  
DOI: <https://doi.org/>  
Поступила в редакцию 04.06.2021  
Подписана в печать 22.04.2022

ISSN 1995-5499

## АНАЛИЗ ДАННЫХ СИСТЕМЫ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ДУБЛИРУЕМОСТИ МАРШРУТОВ

© 2022 Е. В. Касаткина<sup>1,2✉</sup>, Д. Д. Вавилова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АНО «Цифровая экономика Удмуртской Республики»  
ул. Ленина, 21, 426004 Ижевск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
ул. Студенческая, 7, 426069 Ижевск, Российская Федерация

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию схемы движения общественного транспорта в городской среде с целью корректировки и оптимизации топологии транспортной сети. Для достижения данной цели используется междисциплинарный подход. Применение междисциплинарного подхода к анализу маршрутов движения городского общественного транспорта позволяет оптимизировать их работу и тем самым улучшать качество жизни населения. В статье представлена методика выявления дублируемости маршрутов общественного транспорта в системе городской сети, основанная на применении математического аппарата теории графов и линейной алгебры. Для оценки степени дублируемости маршрутов составлена матрица маршрутов, определены вектор-маршруты, рассчитаны коэффициенты дублируемости на основе проекции одного вектора маршрута на другой. Задача анализа данных схемы движения городского общественного транспорта с целью выявления дублируемых маршрутов решена для системы города Ижевск Удмуртской Республики, включающей 55 маршрутов движения городского транспорта. На основе значения коэффициентов дублируемости и варианта дублирования маршрутов предложены конкретные методы решения задачи планирования топологии транспортной сети. Так, для преодоления проблемы дублируемости маршрутов в системе общественного транспорта города Ижевск предлагается провести синхронизацию расписания более чем у 28 маршрутов, а 6 маршрутов движения общественного транспорта исключить в результате их частичного слияния в 3 маршрута. Описанная методика выявления дублируемых маршрутов может быть применена для систем общественного транспорта в различных городах Российской Федерации.

**Ключевые слова:** общественный транспорт, дублируемость маршрутов, оптимизация схемы движения, матрица маршрутов, проекция вектора на вектор, скалярное произведение векторов.

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка функционирования городского общественного транспорта является одной из актуальных задач для создания эффективной

системы умного города [1, 2]. Решение данной проблемы влияет на качество жизни населения и затрагивает интересы подавляющего большинства граждан [3].

Городской общественный транспорт и оптимизация его работы – это актуальный объект исследований, внимание к которому растет пропорционально мировому уровню

---

✉ Касаткина Екатерина Васильевна  
e-mail: [kasatkina@istu.ru](mailto:kasatkina@istu.ru)



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

автомобилизации. Острота транспортной проблемы требует системного подхода к решению задачи оптимизации работы городского общественного транспорта, в том числе маршрутов его движения.

Обзор литературы зарубежных и отечественных исследователей показал, что в качестве основных критериев оптимизации работы общественного транспорта выступают: доступность транспорта [4, 5], эффективная загрузка общественных транспортных средств [6, 7], дублируемость маршрутов [8, 9], сменяемость пассажиропотоков [10, 11].

Известно, что миссией системы городского общественного транспорта является обеспечение высокой мобильности граждан и удовлетворение спроса на передвижение населения с целью сохранения необходимого качества обслуживания [12]. Однако, с точки зрения экономической целесообразности и диверсификации работы транспортных средств для компаний отрицательно сказывается наличие дублируемых маршрутов. Они появляются для перехвата пассажиропотоков с других маршрутов, что увеличивает конкуренцию между компаниями-перевозчиками и снижает экономическую эффективность [13].

Таким образом, для решения существующей проблемы оптимизации работы городского общественного транспорта необходимо расширить базу применяемых методов, в том числе за счет разработки методики определения дублируемости маршрутов в городской транспортной сети.

Целью настоящего исследования является определение дублируемости маршрутов общественного транспорта для разработки рекомендаций по оптимизации транспортной системы города. Данное исследование проведено на примере транспортной сети города Ижевск Удмуртской Республики. Несмотря на значительное увеличение количества легковых автомобилей в транспортном потоке, в г. Ижевске сохраняется высокая доля использования общественного транспорта среди всех осуществляемых пассажирских перевозок в городе.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дублируемость маршрутов – это совпадение маршрутов движения городского общественного транспорта на отдельных участках улично-дорожной сети города, либо полное их наложение [14, 15].

Оценка степени дублируемости маршрутов основана на соотношении протяженности участка улично-дорожной сети совпадающих маршрутов к общей протяженности рассматриваемых маршрутов. Данный метод оценки степени дублируемости маршрутов затруднен необходимостью определения протяженности каждого из рассматриваемых маршрутов. Поскольку путь движения общественного транспорта между остановочными пунктами не влияет на точки посадки/высадки пассажиров, следовательно, необходимо разработать метод, не учитывающий данный путь, при этом основанный на анализе входящих в маршруты остановок (узлов).

Степень дублируемости маршрутов разделяют на следующие группы [16]:

- совпадение маршрутов до 40 % от протяженности маршрута (в этом случае проведение мероприятий по снижению дублируемости маршрутов не требуется);

- совпадение маршрутов от 40 % до 60 % от протяженности маршрута (в этом случае необходимо провести синхронизацию расписания маршрутов);

- совпадение маршрутов от 60 % до 80 % от протяженности маршрута (такой показатель степени дублируемости может быть поводом для исключения из реестра одного из маршрутов в результате слияния маршрутов в один, а в иных случаях потребовать корректировки интервалов движения транспорта по данным маршрутам);

- совпадение маршрутов более 80 % от его протяженности (крайне нежелательная степень дублируемости маршрутов, что требует пространственного анализа).

В данной работе для определения степени дублируемости маршрутов городского общественного транспорта между собой применяется математический инструмента-

рий теории графов, линейной алгебры и статистического анализа.

Методы решения задачи планирования топологии транспортной сети для преодоления проблемы дублируемости маршрутов зависят от варианта дублируемости маршрутов (см. рис. 1):

Вариант № 1: Первый маршрут (более короткий) полностью дублирует участок второго маршрута. Метод решения: исключение короткого маршрута, длинный второй маршрут переходит в оптимальный.

Вариант № 2: Исходные маршруты имеют совместный участок движения, на котором находятся конечные остановочные пункты каждого маршрута. Метод решения: наиболее востребованный маршрут удлиняется, так чтобы другой маршрут полностью входил в удлиненный оптимальный маршрут. Тем самым, мы получаем первый вариант дублируемости маршрутов, поэтому более короткий маршрут исключается.

Вариант № 3: Исходные маршруты имеют совместный участок движения, на котором один из маршрутов отклоняется от другого на небольшой участок (не более трех остановок) и заканчивается конечной останов-

кой. Метод решения: наиболее востребованный маршрут удлиняется, так чтобы другой маршрут полностью входил в удлиненный оптимальный маршрут, при этом сохраняющийся маршрут проходит по участку с ответвлением с возвратом.

Вариант № 4: Исходные маршруты имеют совпадающие траектории движения, но по ходу движения отклоняются друг от друга на нескольких участках пути, но не более чем на 500 метров. Метод решения: оптимальный маршрут включает в себя конечные остановки обоих маршрутов и проходит по более приоритетным улицам.

Таким образом, ставится задача оптимизации транспортной сети за счет поиска и исключения дублируемости маршрутов движения общественного транспорта. Исходя из степени и варианта дублируемости маршрутов предлагаются различные методы решения задачи планирования оптимальной топологии транспортной сети.

## 2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДУБЛИРУЕМОСТИ МАРШРУТОВ

Для выявления дублируемых маршрутов предлагается методика, основанная на применении математического аппарата теории графов, линейной алгебры и статистического анализа.

Используя теорию графов [17], представим схему движения общественного транспорта с помощью матрицы маршрутов.

**Определение.** Матрица маршрутов  $W$  представляет собой таблицу бинарных данных размерностью  $N \times M$ , где  $N$  – число узлов (остановочных пунктов) в транспортной сети города,  $M$  – количество маршрутов общественного транспорта. Если  $i$ -й узел входит в  $j$ -й маршрут, то  $W_{ij} = 1$ , иначе  $W_{ij} = 0$ .

Коэффициент дублируемости маршрута  $k$  маршруту  $j$  будем определять как отношение количества совпадающих остановок у двух маршрутов на количество остановок маршрута  $k$ :

$$d_{m_j} m_k = \frac{\sum_{i=1}^N (W_{ik} \cdot W_{ij})}{\sum_{i=1}^N W_{ik}}. \quad (1)$$

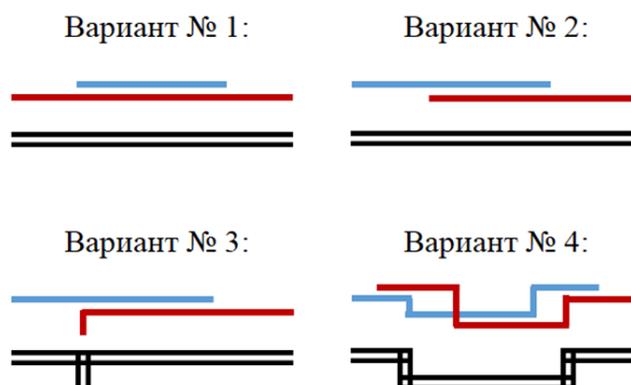
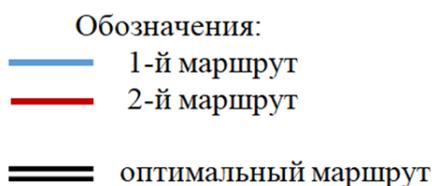


Рис. 1. Варианты дублируемости маршрутов общественного транспорта и способы ее исключения  
[Fig. 1. Duplication options public transport routes and ways to exclude it]

Введем понятие вектор-маршрута как соответствующего столбца матрицы маршрутов  $W$ . Поскольку вектор-маршрут является бинарным, то коэффициент дублируемости можно рассчитывать по следующей формуле:

$$d_{m_j m_k} = \frac{(m_k, m_j)}{(m_k, m_k)} \quad (2)$$

где  $(m_k, m_j)$  – скалярное произведение между столбцами матрицы  $W$  соответствующих маршрутов.

Поскольку:

$$(m_k, m_j) = |m_k| \cdot |m_j| \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

где  $|m_k|$  – норма вектор-маршрута;  $\varphi$  – угол между векторами маршрутами  $m_k, m_j$ , то

$$d_{m_j m_k} = \frac{|m_j|}{|m_k|} \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

Зная, что  $\text{Pr}_{m_k} m_j = |m_j| \cdot \cos \varphi$ , получим, что коэффициент дублируемости маршрута  $k$  маршруту  $j$  будем определять как отношение проекции вектор-маршрута  $m_j$  на вектор-маршрут  $m_k$  к его норме:

$$d_{m_j m_k} = \frac{\text{Pr}_{m_k} m_j}{|m_k|} \quad (5)$$

На основании рассчитанных коэффициентов формируется матрица дублируемости  $D = (d_{m_j m_k} \cdot 100\%)_{M \times M}$  маршрутов общественного транспорта, элементы которой характеризуют в процентах степень вхождения  $k$ -го маршрута в  $j$ -й маршрут и принимают значения в интервале от 0 до 100.

Исходя из значения коэффициентов и варианта дублируемости, предлагается конкретное управленческое решение задачи планирования топологии транспортной сети для преодоления проблемы дублируемости маршрутов.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенная методика применена для системы движения общественного транспорта г. Ижевска Удмуртской Республики по состоянию на 01.09.2021 г. Транспортная система г. Ижевска включает в себя объекты: 323 остановочных пунктов и 55 маршрутов городского общественного транспорта, из них

автобусных – 26, трамвайных – 11, троллейбусных – 8, маршрутных такси – 10.

Анализ системы движения общественного транспорта выполняется на основе коэффициентов дублируемости, расчет которых не зависит от типа общественного транспорта, однако эта информация важна для оптимизации всей системы. Мероприятия по оптимизации работы общественного транспорта отличаются для различных видов транспорта. Например, смена направления маршрута для трамваев и троллейбусов затруднительна.

Таблица 1. Фрагмент матрицы маршрутов  $W$  гор. Ижевска

[Table 1. Fragment of the matrix public transport routes  $W$  of the Izhevsk]

Остановки / Маршруты	2	6	7	8	9	10	11
Автозавод	0	0	0	0	0	1	0
Адм. Лен. р-на	0	0	1	0	1	0	1
Ижсталь	0	0	1	1	1	0	1
База РХТ	1	1	0	0	0	0	0
База УПС	1	1	0	0	0	0	0
Банк	0	0	1	0	0	0	0
Библиотека	0	0	0	1	0	0	0
Долгий мост	1	1	1	1	1	0	1
Заводоуправ.	0	0	0	1	0	1	0
К/Т Дружба	0	0	0	0	0	1	0
Пирожковая	1	0	0	1	0	0	1

Для поиска дублируемых маршрутов в транспортной сети города Ижевска использовалась информация о маршрутах общественного транспорта города, представленная на сайте интерактивной геоинформационной справочной системы IGIS [18]. По этим данным была заполнена матрица маршрутов общественного транспорта гор. Ижевска размерностью  $323 \times 55$ . В табл. 1 представлен фрагмент данной матрицы маршрутов. На основе матрицы маршрутов с применением формулы (5) рассчитаны элементы матрицы дублируемости маршрутов  $D$ , представленные на рис. 2.

Далее на основе рассчитанных коэффициентов определена степень дублируемости



Таблица 2. Оценка дублируемости маршрутов  
[Table 2. Route Duplication Assessment]

Маршрут $m_k$	Дублируемый маршрут $m_j$ (коэффициент дублирования, %)			
	$40\% < d \leq 60\%$	$60\% < d \leq 80\%$	$80\% < d \leq 100\%$	
Автобус	2	-	6AB(79),41AB(79)	-
	6	-	2AB(73),41AB(67)	-
	7	73AB(60)	-	-
	8	26AB(43),27AB(43)	21AB(74)	34(83)
	9	7AB(46)	-	11AB(85),73AB(85)
	11	7AB(46),36AB(46)	73AB(77)	9AB(85)
	12	26AB(42),10TX(46),53TX(42)14TB(42)	27AB(67)	-
	15	-	-	-
	16	23AB(58),1TB(42),2TB(42)	68TX(71)	-
	19	1TB(52)	39TX(65)	-
	21	8AB(52),34(54)	-	-
	22	25AB(42),49TX(42)	-	-
	23	16AB(58),68TX(46)	-	-
	25	22AB(42),6TB(42),10TB(49)	49TX(67)	-
	26	27AB(42),39TX(42),50TX(42), 4TB(45),7TB(50),14TB(47)	-	-
	27	12AB(44),26AB(44),18TX(44), 50TX(47),53TX(42),10TB(42)	14TB(61)	-
	28	79AB(50)	-	-
	29	36AB(59),79AB(59),39TX(50),52TX(44),6TB(47)	18TX(76)	-
	31	27AB(44),29AB(48),79AB(44),18TX(44),49TX(44)	-	-
	34	45TX(45),53TX(41),9TB(48),10TB(41)	8AB(66),21AB(62)	-
	36	-	-	-
	40	10TX(52)	-	-
	41	-	6AB(71),2AB(79)	-
56	-	-	-	
73	7AB(47),9AB(58),11AB(53)	-	-	
79	29AB(53),29AB(53),6TB(42)	18TX(61)	-	
Маршрутное такси	10	12AB(48),31AB(43),40AB(52)	79AB(61)	-
	18	27AB(43),36(43),52TX(49),6TB(43)	29AB(70),79AB(62)	-
	39	19AB(48),26AB(52),29AB(55), 49TX(42),4TB(55),7TB(58),14TB(48)	-	-
	45	34AB(45),50TX(45),53TX(59), 9TB(41),10TB(59),14TB(48)	-	-
	49	22AB(46),10TB(46)	25AB(74)	-
	50	22AB(53),26AB(50),27AB(53),45TX(41),10TB(41)	53TX(62)	14TB(91)
	52	27AB(48),79AB(57),39TX(43)	29AB(65),18AB(78)	-
	53	45TX(44),50TX(51),10TB(41),14TB(46)	-	-
	68	16AB(50)	2TB(79)	-
71	-	-	-	

Таблица 2 (продолжение)

Трамвай	1	3ТW(52),4ТW(52),10ТW(52),12ТW(52)	9ТW(68)	
	2	4ТW(54),7ТW(50),8ТW(42)	9ТW(67)	
	3	25АВ(43),2ТW(43),4ТW(43)	1ТW(62),5ТW(62), 9ТW(62),12ТW(76)	
	4	3ТW(43),7ТW(43)	1ТW(62),2ТW(62), 10ТW(76)	
	5	3ТW(41),8ТW(41),9ТW(47),12ТW(50)	–	–
	7	1ТW(45),2ТW(60),4ТW(45),9ТW(60),10ТW(45)	–	–
	8	2ТW(56),11ТW(44)	5ТW(72)	–
	9	2ТW(57),3ТW(46),5ТW(54),7ТW(43),12ТW(46)	1ТW(61)	–
	10	1ТW(50),12ТW(54)	4ТW(62)	–
	11	8ТW(53)	10ТW(67),12ТW(67)	–
	12	1ТW(50),9ТW(50),10ТW(54)	3ТW(62),5ТW(62)	–
	Троллейбус	1	16АВ(48),19АВ(57),23АВ(43), 26АВ(52),4ТВ(48),7ТВ(57)	68ТХ(62),2ТВ(62)
2		1ТВ(41),4ТВ(56)	–	68ТХ(84)
4		26АВ(49),39ТХ(49),49ТХ(43),2ТВ(51),7ТВ(49)	–	–
6		25АВ(50),29АВ(44),36АВ(50),79АВ(44),18ТХ(44), 49ТХ(42),9ТВ(50),10ТВ(50)	–	–
7		29АВ(57),50ТХ(43),1ТВ(52)	4ТВ(74),14ТВ(65), 39ТХ(78)	26АВ(83)
9		34АВ(45),6ТВ(58),10ТВ(42)	36АВ(61)	–
10		25АВ(60),27АВ(43),45ТХ(49),49ТХ(51), 53ТХ(46),6ТВ(51),14ТВ(51)	–	–
14		22АВ(43),26АВ(49),27АВ(59),39ТХ(41), 53ТХ(49),7ТВ(41),10ТВ(49)	50ТХ(78)	–

Условные обозначения: АВ – автобус; ТW – трамвай; ТВ – троллейбус; ТХ – маршрутное такси

ют друг друга в диапазоне 67–79 %. В этом случае часть маршрутов можно исключить в результате слияния маршрутов в один либо провести корректировку интервалов движения транспорта по данным маршрутам.

В последнюю четвертую группу маршрутов по степени дублирования ( $80\% < d \leq 100\%$ ) вошли 6 маршрутов движения общественного транспорта: автобус № 8, № 9, № 11, маршрутное такси № 50, троллейбус № 2, № 7. Для данных маршрутов согласно варианту дублируемости разрабатываются конкретные рекомендации по их оптимизации. На рис. 3, б) иллюстрируется наложение маршрутов № 9 и № 11, из которого видно, что маршруты практически совпадают и только две конечные остановки отклоняются от об-

щего маршрута следования (вариант № 3 на рис. 1). Поскольку наиболее востребованным является маршрут № 11, то предлагается исключить из транспортной сети города маршрут № 9, при этом движение маршрута № 11 продолжить на участке следования удаляемого маршрута с возвращением на свой путь движения. Маршрут № 8 на 83 % совпадает с маршрутом № 34 (см. рис. 4), но данный случай дублирования маршрутов относится к варианту 4 (рис. 1). Для устранения дублируемости следует оставить более протяженный маршрут № 34, но пустить его на участке пути, на котором маршруты различаются, по центральной улице Баранова (см. рис. 4, новый участок пути отмечен пунктирной линией), которая является параллельной улицам Клуб-



Рис. 3. Схема автобусных маршрутов гор. Ижевска: маршрут №2, №6 и №41 (а) и маршрут №9 и №11 (б)

[Fig. 3. Scheme of bus routes in the Izhevsk: No. 2, No. 6, No. 41 (a) and No. 9, No. 11 (b)]

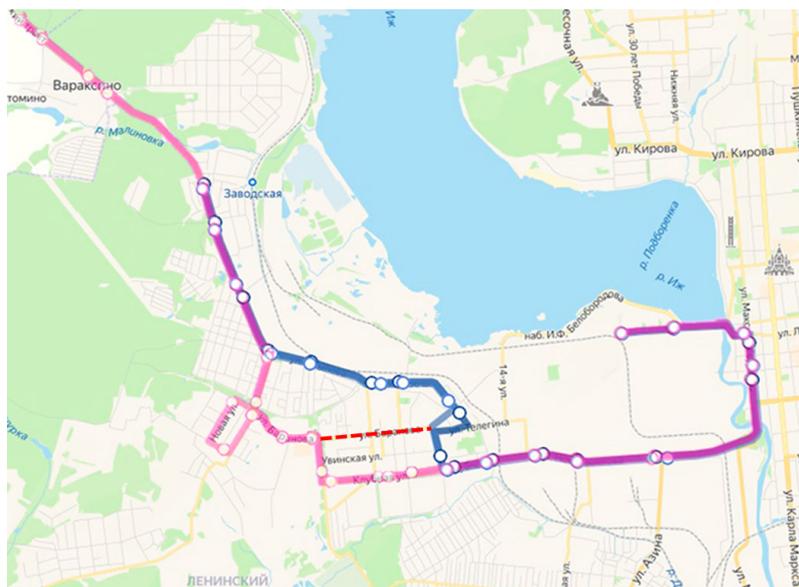


Рис. 4. Оценка дублируемости автобусных маршрутов №8 и №34 гор. Ижевска  
[Fig. 4. Duplication assessment of bus routes No. 8 and No. 34 in the Izhevsk]

ная (маршрут № 34) и Заречное шоссе (маршрут № 8). Таким образом, 6 маршрутов движения общественного транспорта, входящих в данную группу дублирования, будут преобразованы в результате исключения и корректировки в 3 маршрута.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья посвящена анализу данных системы городского общественного транспорта для решения проблемы дублируемости маршрутов. Впервые представлена методика определения дублируемости маршрутов на основе математического аппарата теории графов и линейной алгебры.

Для расчета коэффициента дублируемости маршрутов составляется матрица маршрутов и для каждого вектор-маршрута определяются коэффициенты на основе проекции одного вектора маршрута на другой.

Для оценки степени дублируемости маршрутов предложено разделение маршрутов на 4 группы: совпадение маршрутов до 40 %; от 40 % до 60 %; от 60% до 80 %; совпадение маршрутов более 80 % от его протяженности.

На основе значения коэффициентов дублируемости и варианта дублирования маршрутов предложены конкретные методы решения задачи планирования топологии транспортной сети.

Маршруты первой группы не нуждаются в изменении; маршруты второй группы сохраняются в системе, но оптимизация сети общественного транспорта выполняется за счет корректировки интервалов движения; оптимизация маршрутов третьей и четвертой группы предполагает объединение и удаление ряда маршрутов движения, что приводит к сокращению количества эксплуатируемого транспорта.

С использованием разработанной методики выполнена оценка степени дублируемости между 55 маршрутами города Ижевск Удмуртской Республики.

Так, для преодоления проблемы дублируемости маршрутов в системе общественного транспорта города Ижевск предлагается провести синхронизацию расписания более чем у 28 маршрутов, а 6 маршрутов движения общественного транспорта заменить 3 маршрутами в результате их частичного слияния.

Дальнейшее исследование в рамках проекта будет заключаться во внедрении после согласования данных рекомендаций. По предварительным расчетам, эффективность предложенных в статье мероприятий по оптимизации сети общественного транспорта г. Ижевск оценивается в виде снижения количества эксплуатируемых транспортных средств примерно на 14 %, достигаемое за счет сокращения на четверть количества общественного транспорта на маршрутах, входящих в третью и четвертую группы.

Описанная методика выявления дублируемых маршрутов может быть применена для систем общественного транспорта в различных городах Российской Федерации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горемыко, В. М.* Концепция «Умный Город» в рамках городских пассажирских перевозок / В. М. Горемыко, В. Н. Соколов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2020. – № 3 (42). – С. 145–147.
2. *Петрова, Д. В.* Современные подходы к организации мониторинга пассажиропотоков общественного транспорта городских агломераций / Д. В. Петрова // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 47–57.
3. *Касаткина, Е. В.* Информационно-аналитическая система прогнозирования обобщающих показателей развития региона / Е. В. Касаткина, Д. Д. Вавилова // Проблемы управления. – 2015. – № 4. – С. 25–34.
4. *Широкорад, О. А.* Доступность общественного транспорта в городе Владивостоке / О. А. Широкорад, М. Б. Урбановский // Автомобильный транспорт Дальнего Востока. – 2016. – № 1. – С. 337–340.
5. *Merlin, L. A.* Influences on transit ridership and transit accessibility in US urban areas / L. A. Merlin, M. Singer, J. Levine // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2021. – V. 150. – P. 63–73. DOI: 10.1016/j.tra.2021.04.014.
6. *Сафронов, К. Э.* Алгоритм управления загрузкой улично-дорожной сети транспортными потоками при формировании доступной маршрутной сети / К. Э. Сафронов, Э. А. Сафронов, Е. С. Семенова // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2016. – № 11 (90). – С. 41.
7. *Xie, J.* A schedule-based timetable model for congested transit networks / J. Xie, S. Zhan,

S. C. Wong, S. M. Lo // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2021. – V. 124. – 102925. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102925.

8. Цариков, А. А. Организация маршрутов городского пассажирского транспорта с учетом бесплатных пересадок / А. А. Цариков, В. Г. Бондаренко, М. С. Пятанов // *Инновационный транспорт*. – 2020. – № 2 (36). – С. 18–26. DOI:10.20291/2311-164X-2020-2-18-26.

9. Ду, С. Transfer performance evaluation indicators and method on urban public transportation network / С. Du, W. Ren, J. Chen // *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*. – 2014. – V. 38(2). – P. 418–421. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2014.02.040.

10. Корягин, М. Е. Оптимизация городской транспортной системы при различных целях муниципальных органов власти, транспортных операторов и пассажиров / М. Е. Корягин, К. Л. Комаров // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. – 2018. – № 4 (47). – С. 36–41.

11. Marques, S. F. Ridership Estimation Along Bus Transit Lines Based on Kriging: Comparative Analysis Between Network and Euclidean Distances / S. F. Marques, C. S. Pitombo // *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*. – 2021. – V. 5(1), 7. DOI: 10.1007/s41651-021-00075-w.

12. Гозбенко, В. Е. Повышение эффективности функционирования транспортной сети городского пассажирского транспорта путем применения автоматизации модели выбора оптимального подвижного состава / В. Е. Гозбенко, М. Н. Крипак, О. А. Лебедева, С. К. Каргапольцев // *Современные технологии. Си-*

*стемный анализ. Моделирование*. – 2017. – № 2 (54). – С. 203–208.

13. Мартынова, Ю. А. Формализация задачи организации маршрутных сетей городского пассажирского транспорта / Ю. А. Мартынова, Я. А. Мартынов // *Интернет-журнал Науковедение*. – 2014. – № 6 (25). – С. 121.

14. Абаимов, Р. В. Автомобильный транспорт / Р. В. Абаимов, Ю. С. Бахрачева, А. В. Васильев, А. А. Конев, В. И. Кычкин, Е. И. Лежнева, Н. С. Севрюгина. – Новосибирск: Изд-во «СибАК», 2013. – 168 с.

15. Кузькина, Н. А. Оценка степени дублирования городского пассажирского транспорта пригородными маршрутами / Н. А. Кузькина, Е. М. Лаврушина, Е. А. Евтикова // *Материалы VIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум»*. – 2016. URL: <https://scienceforum.ru/2016/article/2016020238>.

16. Вельможин, А. В. Эффективность городского пассажирского общественного транспорта / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, А. В. Куликов, А. А. Сериков. – Волгоград: ВолгГТУ, 2002. – 256 с.

17. Иорданский, М. А. Конструктивная теория графов и ее приложения / М. А. Иорданский. – Н. Новгород : Кириллица, 2016. – 172 с.

18. Интерактивная геоинформационная справочная система IGIS. URL: <https://igis.ru/gortrans>.

19. Ларин, О. Н. Вопросы образования конфликтных ситуаций на маршрутных сетях муниципальных образований / О. Н. Ларин, А. А. Кажаяев // *Вестник БрГТУ*. – 2010.

**Касаткина Екатерина Васильевна** – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова, Data-аналитик АНО «Цифровая экономика Удмуртской Республики»

E-mail: [kasatkina@istu.ru](mailto:kasatkina@istu.ru)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6596-0086>

**Вавилова Дайана Дамировна** – аспирант, ст. преподаватель кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова.

E-mail: [vavilova\\_dd@mail.ru](mailto:vavilova_dd@mail.ru)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2161-4402>

## DATA ANALYSIS OF PUBLIC URBAN TRANSPORT SYSTEM TO SOLVE THE PROBLEM OF ROUTE DUPLICATION

© 2022 E. V. Kasatkina<sup>1,2✉</sup>, D. D. Vavilova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Autonomous nonprofit organization “Digital Economy of the Udmurt Republic”

21, Lenina Street, 426004 Izhevsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University

7, Studencheskaya Street, 426069 Izhevsk, Russian Federation

**Annotation.** The article is devoted to the study of public transport traffic patterns in the urban environment in order to correct and optimize the transport network topology. To achieve this purpose, an interdisciplinary approach is used. The application of an interdisciplinary approach to the analysis of urban public transport routes allows to optimize their work and thereby improve the quality of the population life. The article presents a methodology for identifying duplication of public transport routes in the urban network system, based on the mathematical apparatus of graph theory, linear algebra and statistical analysis. To assess the degree of route duplication, a matrix of routes is compiled, vector routes are determined, paired duplication coefficients are calculated based on the projection of one route vector to another. The task of analyzing the data of the urban public transport traffic pattern in order to identify duplicate routes was solved for the system of the Izhevsk city in the Udmurt Republic, which includes 55 routes of urban transport. Based on the duplication coefficients values and the route duplication option, specific methods for solving the problem of planning the transport network topology are proposed. So, in order to overcome the problem of duplication of routes in the public transport system of the Izhevsk city, it is proposed to synchronize the timetable for more than 28 routes, and exclude 6 public transport routes as a result of their merging into 3 routes. The described technique for identifying duplicate routes can be applied to public transport systems in various cities of the Russian Federation.

**Keywords:** public transport, route duplication, traffic pattern optimization, route matrix, vector-to-vector projection, scalar product of vectors.

### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

### REFERENCES

1. Goremyko V. M. and Sokolov V. N. (2020) Konceptiya «Umnyj Gorod» v ramkah gorodskih passazhirskih perevozok [The “Smart City” concept in the framework of urban passenger transportation]. *Technical Regulation in Transport Construction*. No 3 (42). P. 145–147. (in Russian).

2. Petrova D. V. (2020) Sovremennye podhody k organizacii monitoringa passazhiro-potokov obshhestvennogo transporta gorodskih aglomeracij [Modern approaches to organizing monitoring of public transport passenger traffic in urban agglomerations]. *International Journal of Open Information Technologies*. Vol. 8, No 1. P. 47–57. (in Russian).

3. Kasatkina E. V. and Vavilova D. D. (2015) Informatsionno-analiticheskaya sistema prognozirovaniya obobshchayushchikh pokazateley razvitiya regiona [Information and analytical system for forecasting the main indicators of regional development]. *Control Sciences*. No. 4. P. 25–34. (in Russian).

4. Shirokorad O. A. and Urbanovskij M. B. (2016) Dostupnost' obshhestvennogo transporta v

✉ Kasatkina Ekaterina V.  
e-mail: kasatkina@istu.ru

gorode Vladivostoke [Availability of public transport in the city of Vladivostok]. *Automobile transport of the Far East*. No 1. P. 337–340. (in Russian).

5. Merlin L. A., Singer M. and Levine J. (2021) Influences on transit ridership and transit accessibility in US urban areas. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 150. P. 63–73. DOI: 10.1016/j.tra.2021.04.014.

6. Safronov K. Je., Safronov Je. A. and Semenova E. S. (2016) Algoritm upravlenija zagruzkoj ulichno-dorozhnoj seti transportnymi potokami pri formirovanii dostupnoj marshrutnoj seti [Algorithm for controlling the traffic flow load of the road network when forming an accessible route network]. *Chronicles of the joint fund of electronic resources Science and education*. No 11 (90). P. 41. (in Russian).

7. Xie J., Zhan S., Wong S. C. and Lo S. M. (2021) A schedule-based timetable model for congested transit networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 124. – 102925. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102925.

8. Carikov A. A., Bondarenko V. G. and Pjatanov M. S. (2020) Organizacija marshrutov gorodskogo passazhirskogo transporta s uchedom besplatnyh peresadok [Organization of routes of urban public passenger transport taking into account free-of-charge transfers]. *Innovative transport*. No 2 (36). P. 18–26. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-2-18-26. (in Russian).

9. Du C., Ren W. and Chen J. (2014) Transfer performance evaluation indicators and method on urban public transportation network. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*. V. 38(2). P. 418–421. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2014.02.040.

10. Korjagin M. E. and Komarov K. L. (2018) Optimizacija gorodskoj transportnoj sistemy pri razlichnyh celjah municipal'nyh organov vlasti, transportnyh operatirov i passazhirov [Optimization of the urban transport system for various purposes of municipal authorities, transport operators and passengers]. *Journal of the Siberian State University of Railways*. No 4 (47). P. 36–41. (in Russian).

11. Marques S. F. and Pitombo C. S. (2021) Ridership Estimation Along Bus Transit Lines Based on Kriging: Comparative Analysis Between Network and Euclidean Distances. *Jour-*

*nal of Geovisualization and Spatial Analysis*. Vol. 5(1), 7. DOI: 10.1007/s41651-021-00075-w.

12. Gozbenko V. E., Kripak M. N., Lebedeva O. A. and Kargapolčev S. K. (2017) Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija transportnoj seti gorodskogo passazhirskogo transporta putem primeneniya avtomatizacii modeli vybora optimal'nogo podvizhnogo sostava [Improvement in the functioning of transport network of urban passenger transport by using automation of optimal rolling stock selection model]. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. No 2 (54). P. 203–208. (in Russian).

13. Martynova Ju. A. and Martynov Ja. A. (2014) Formalizacija zadachi organizacii marshrutnyh setej gorodskogo passazhirskogo transporta [Formalization of the problem of organizing route networks of urban passenger transport]. *Online Journal of Science*. No 6 (25). P. 121. (in Russian).

14. Abaimov R. V., Bahracheva Ju. S., Vasil'ev A. V., Konev A. A., Kychkin V. I., Lezhneva E. I. and Sevrjugina N. S. (2013) Avtomobil'nyj transport [Automobile transport]. Novosibirsk : Publishing house "SibAK". (in Russian).

15. Kuz'kina N. A., Lavrushina E. M. and Evtikova E. A. (2016) Ocenka stepeni dublirovaniya gorodskogo passazhirskogo transporta prigradnymi marshrutami [Assessment of the degree of duplication of urban passenger transport by suburban routes]. *Materials of the VIII International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum"*. (in Russian).

16. Vel'mozhin A. V., Gudkov V. A., Kulikov A. V. and Serikov A. A. (2002) Jeffektivnost' gorodskogo passazhirskogo obshhestvennogo transporta [Efficiency of urban passenger public transport]. Volgograd : VolgGTU (in Russian).

17. Iordanskij M. A. (2016) Konstruktivnaja teorija grafov i ee prilozhenija [Constructive graph theory and its applications]. N. Novgorod : Cyrillic. (in Russian).

18. IGIS Interactive Geographic Information System. URL: <https://igis.ru/gortrans>.

19. Larin O. N. and Kazhaev A. A. (2010) Voprosy obrazovanija konfliktnyh situacij na marshrutnyh setjah municipal'nyh obrazovanij [Questions of formation of disputed situations on routing networks of municipal formations]. *Bulletin of Brest State Technical University*. Vol. 5. P. 60–63. (in Russian).

*Е. В. Касаткина, Д. Д. Вавилова*

**Kasatkina Ekaterina V.** — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Information Technology, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Data-analyst of the autonomous nonprofit organization “Digital Economy of the Udmurt Republic”.

E-mail: [kasatkina@istu.ru](mailto:kasatkina@istu.ru)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6596-0086>

**Vavilova Daiana D.** — postgraduate, Senior Lecturer, Department of Applied Mathematics and Information Technology, Kalashnikov Izhevsk State Technical University.

E-mail: [vavilova\\_dd@mail.ru](mailto:vavilova_dd@mail.ru)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2161-4402>