

Научная статья  
УДК 656.13.022

## Интеллектуальная система мультимаршрутного планирования работы пассажирских транспортных средств

**Сергей Александрович Аземша**

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ),  
Гомель, Республика Беларусь

s-azemsha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме повышения эффективности работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения. Автором указана ключевая проблема противоречия между показателями окупаемости (которая зависит от степени использования вместимости маршрутных транспортных средств) и качества услуги (определяемого интервалами движения). В качестве решения предложен переход от традиционного помаршрутного планирования к мультимаршрутному методу организации работы пассажирских транспортных средств. Основное содержание работы составляет описание проектируемой интеллектуальной системы мультимаршрутного планирования, функционирующей по замкнутому циклу: сбор и накопление данных о пассажиропотоке и внешних факторах, прогнозирование пассажиронапряженности на рейсах и, на основе этого прогноза, построение оптимальных суточных заданий для парка маршрутных транспортных средств, позволяющих одному такому транспортному средству обслуживать ездки нескольких маршрутов в течение смены. Приведены результаты сравнительного анализа помаршрутного и мультимаршрутного методов организации работы, которые демонстрируют снижение затрат на работу маршрутных транспортных средств на 5,1% за счет повышения коэффициента пассажиронапряженности, что в итоге обеспечивает срок окупаемости внедрения такой системы около трех лет.

**Ключевые слова:** городской пассажирский транспорт регулярного сообщения, мультимаршрутное планирование, интеллектуальная система управления, эффективность перевозок, пассажиропоток, прогнозирование, маршрутное транспортное средство, окупаемость, оптимизация работы транспорта.

**Для цитирования:** Аземша С.А. Интеллектуальная система мультимаршрутного планирования работы пассажирских транспортных средств // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 1 (47).

Original article

## Public transport Intelligent Multi-Route Planning System

**Sergey A. Azemsha**

Belarusian State University of Transport (BelSUT), Gomel, Republic of Belarus

s-azemsha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>

**Abstract.** The article addresses the problem of improving the efficiency of urban scheduled passenger transport in the Republic of Belarus. The author identifies a key contradiction between the indicators of cost recovery (which depends on the capacity utilization of route vehicles) and service quality (determined by service intervals). As a solution, a transition from traditional route-based planning to a multi-route method of organizing vehicle operations is proposed. The main content of the work consists of a description of a designed intelligent multi-route planning system operating in a closed cycle: collection of data on passenger flows and external factors, forecasting passenger load intensity on trips, and, based on this forecast, constructing optimal daily assignments for the fleet of route vehicles. This system allows one vehicle to serve several routes during a shift. The results of a comparative analysis are presented, demonstrating a 5.1% reduction in operating costs for route vehicles due to an increased passenger load factor, which ensures a payback period for implementing such a system of approximately three years.

**Keywords:** public transport, multi-route planning, intelligent control system, transport efficiency, passenger flow, forecasting, route vehicle, cost recovery, transport operations optimization.

**For citation:** Azemsha S.A. Public transport Intelligent Multi-Route Planning System. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. № 1 (47).

### Введение

Повышение мобильности в городах обеспечивается, в основном, двумя основными путями: за счет роста автомобилизации и увеличением числа поездок на городском пассажирском транспорте регулярного сообщения (ГПТРС). Анализ преимуществ и недостатков таких путей приведен в [1–3, глава 1, 4, 5] и показывает целесообразность развития ГПТРС. Усилия для

№ 1(47)

март 2026

этого предпринимаются во многих странах, в то время как в Республике Беларусь преобладают тенденции роста мобильности за счет роста автомобилизации [6], что обусловлено низкой эффективностью работы ГПТРС и необходимостью бюджетного субсидирования его деятельности.

Упрощённо под эффективностью работы ГПТРС можно понимать соотношение финансовых вложений на выполнение этой работы к величине результата от таких вложений [7–11]. Вложения на выполнение работы ГПТРС могут быть оценены окупаемостью, а результат таких вложений – показателями качества транспортной услуги. Поэтому под повышением эффективности работы ГПТРС можно считать улучшение показателей качества транспортной услуги при неснижении ее окупаемости, и (или) рост окупаемости при неухудшении показателей качества транспортной услуги.

Показано, что окупаемость работы ГПТРС в Республике Беларусь составляет порядка 65% [12] и значимо зависит от степени использования вместимости МТС [12, выражение 1], пассажиропотока на маршруте и вместимости МТС на нем работающих [14, рис. 2]. Также установлено, что основным показателем качества работы ГПТРС пассажиры считают интервалы движения МТС на маршруте [15, рис. 6, 7]. Таким образом получается, что с одной стороны увеличивая интервалы движения можно повысить окупаемость работы за счет увеличения степени использования вместимости, но при этом ухудшится качество предоставляемой транспортной услуги. Уменьшение же интервалов движения ведет к повышению качества оказываемой пассажиру услуги, но при этом будет снижаться окупаемость работы ГПТРС. Таким образом видна необходимость разработки мероприятий, повышающих окупаемость при неувеличении интервала движения.

В [16] показана целесообразность выравнивания интервалов движения на дублирующих маршрутах, что повышает качество оказываемой транспортной услуги за счет снижения времени ожидания на остановочном пункте прибытия

МТС. Это не требует дополнительных вложений, т.е. не ведет к снижению окупаемости. В [3, 17] приведена методика такого выравнивания, а в [18, 19] – даны предложения по совершенствованию такой методики.

В [20–24] показано, что степень использования вместимости МТС невысока и зависит от времени суток, маршрута, направления движения на маршруте. Для повышения степени использования вместимости МТС, а следовательно, окупаемости работы ГПТРС и его эффективности в [25–27] приведено обоснование целесообразности и суть мультимаршрутного метода организации работы МТС, как альтернативы существующему в настоящее время помаршрутному планированию.

### **Основная часть. Сравнение помаршрутного и мультимаршрутного планирования работы**

Организация работы ГПТРС в настоящее время основана на принципе помаршрутного планирования, предусматривающем жесткое закрепление МТС за определенными маршрутами. Данный подход отличается простотой организации и контроля, однако обладает существенными недостатками в условиях динамического изменения пассажиропотоков.

Мультимаршрутное планирование представляет собой принципиально иной подход, при котором обеспечивается гибкое распределение МТС между маршрутами с учетом текущего спроса. Данный метод предусматривает:

- интегрированность и взаимодействие между направлениями перевозок;
- оптимизацию загрузки и динамическое перераспределение ресурсов;
- высокую адаптивность к изменениям пассажиропотоков;
- повышение эффективности использования МТС.

Основное отличие мультимаршрутного подхода заключается в том, что МТС в течение рабочей смены может обслуживать несколько маршрутов, переходя с одного на другой в процессе выполнения езды с пассажирами

[27, рис. 1]. Это позволяет оптимизировать порожние ездки, минимизировать простои и повышать степень использования вместимости МТС. Это в свою очередь повышает окупаемость работы ГПТРС без ухудшения показателей качества его работы (увеличения интервалов движения), что определяет повышение эффективности его работы.

### Оценка эффективности мультимаршрутного метода организации работы МТС

Рассмотренный выше мультимаршрутный метод был опробован на одном из городов со следующими параметрами: население около 35 тыс. чел, ежедневно на линию выходит 13 автобусов, которые работают на 10 маршрутах, выполняя в общем за сутки 109 рейсов. Сравнительный анализ технико-эксплуатационных и экономических показателей работы ГПТРС данного населенного пункта при различных методах организации работы приведен в табл. 1.

Таблица 1

Оценка эффективности мультимаршрутного метода организации работы МТС

Показатели	Суммарное рабочее время, ч	Суммарный пробег, км	Выполненные место · км	Выполненные место · ч	Коэффициент пассажиронапряженности	Стоимость, руб
Помаршрутное планирование	84,2	1315	92009	6007,83	0,352	5460,5
Мультимаршрутное планирование	96,5	1396	67433	3553,17	0,491	5181,5
Эффективность, %	+14,7	+6,2	-26,7	-40,9	+39,6	-5,1

Из приведенного сравнительного анализа видно, что несмотря на небольшой рост суммарного рабочего времени и пробега, наблюдаются

существенные улучшения таких показателей, как выполненные место-км и место-часы, коэффициент пассажиронапряженности, что дает повышение эффективности, заключающейся в снижении себестоимости работы ГПТРС на 5,1%. Качество транспортной услуги (интервал движения) при этом никак не изменяется.

### **Проблемы применения мультимаршрутного метода**

Несмотря на преимущества мультимаршрутного метода, его успешное применение затруднено наличием существенного препятствия – изменчивость пассажиропотоков [28–30]. При этом на колебания пассажиропотока оказывают влияние следующие группы факторов [29, 30]:

1. Календарные факторы – вид дня (праздничный, выходной, рабочий), день недели, месяц года, календарный год.

2. Метеорологические факторы – температура воздуха, осадки, ветер.

Это приводит к тому, что значения пассажиронапряженности будут изменяться и распределение МТС по рейсам, выполненное мультимаршрутным методом будет оптимальное только на тот день, когда проводилось обследование пассажиропотока. Таким образом, для полной реализации потенциала мультимаршрутного метода необходимо внедрение механизмов прогнозирования и адаптивного управления, основанных на данных о реальных колебаниях пассажиропотоков.

### **Интеллектуальная система мультимаршрутного планирования работы пассажирских транспортных средств**

Анализ существующих интеллектуальных систем в области транспорта позволяет выделить следующие основные направления таких систем:

1. Маршрутизация движения транспортных средств (vehicle route problem) [31–33] – используются различные подходы для прогнозирования заторов и, если прогнозируется затор, маршрут пересматривается с учетом различных критериев (расход топлива, выбросы CO<sub>2</sub>). Решаемая проблема –

оптимизация маршрутов для парка транспортных средств из нескольких депо с целью минимизации времени в пути и выбросов при соблюдении временных окон. Вместе с тем следует понимать, что система ориентирована преимущественно на логистику доставки, а не на регулярный пассажирский транспорт. Цикл перепланирования является реактивным (на основе событий), а не проактивным суточным циклом для регулярных маршрутов.

2. Распределение парка МТС по рейсам (Vehicle scheduling problem) [34–39] – класс задач, заключающийся в оптимальном закреплении имеющегося парка МТС за имеющимися рейсами. Их анализ позволил выделить малую практикоориентированность ввиду отсутствия учета хотя бы одного из следующих факторов: достаточность вместимости МТС, разнородности парка МТС, ограничений на обед, отстой на конечных пунктах, необходимости каждой совокупности ездов для МТС начинается и заканчивается в одном и том же депо, комфорт поездок (например, за счет допустимого коэффициента использования вместимости), учитывающих режим труда и отдыха водителя, вместимость конечных остановочных пунктов, динамичность пассажиропотоков.

3. Транспорт по требованию (On-Demand Transport) [40–42] – динамическая диспетчеризация и маршрутизация МТС, в том числе в реальном времени для эффективного обслуживания динамического спроса в зонах с низкой плотностью населения или для задач «первой/последней мили». Однако такие системы работают вне парадигмы фиксированного расписания и регулярных маршрутов. Их цель – индивидуальная оптимизация поездок, а не поддержание регулярности сети.

4. Оптимизация на основе симуляции (Simulation-Based Optimization) [43–47] – объединение агентного симулятора (цифрового двойника) с алгоритмами оптимизации. Симулятор проигрывает сценарии поведения пассажиров и транспорта для оценки стратегий управления, что позволяет

оценить обосновать целесообразность реализации того или иного управленческого решения. Требуется наличие имитационной модели, специализированного программного продукта для проведения симуляции, а также из-за высоких вычислительных требований метод используется преимущественно оффлайн для разработки стратегий, а не как операционная система реального времени.

Таким образом, что существующие решения либо статичны (MDVSP-CTS), либо реактивны (восстановление после сбоев), либо предназначены для нерегулярных сервисов (DRT). Очевидно отсутствие систем, реализующих комплексный, проактивный и замкнутый цикл суточного планирования для регулярных маршрутов.

Для целей повышения эффективности работы ГПТРС путем реализации мультимаршрутного метода организации работы МТС на основе актуальных значений параметров пассажиропотоков предлагается реализовать интеллектуальную систему мультимаршрутного планирования работы МТС (рис. 1). Процесс работы такой системы состоит из следующих последовательных и взаимосвязанных этапов.

1. Этап сбора данных – параметры пассажиропотока фиксируются установленными на МТС детекторами пассажиропотока, оператор (или специальный модуль программного продукта) определяет календарные и метеорологические факторы и вносит их в систему. Это позволяет накапливать информацию о значениях пассажиронапряженности на каждом рейсе, что, в совокупности с календарными и погодными факторами будет являться основой для прогнозирования значений пассажиронапряженности для каждого рейса на последующие сутки.

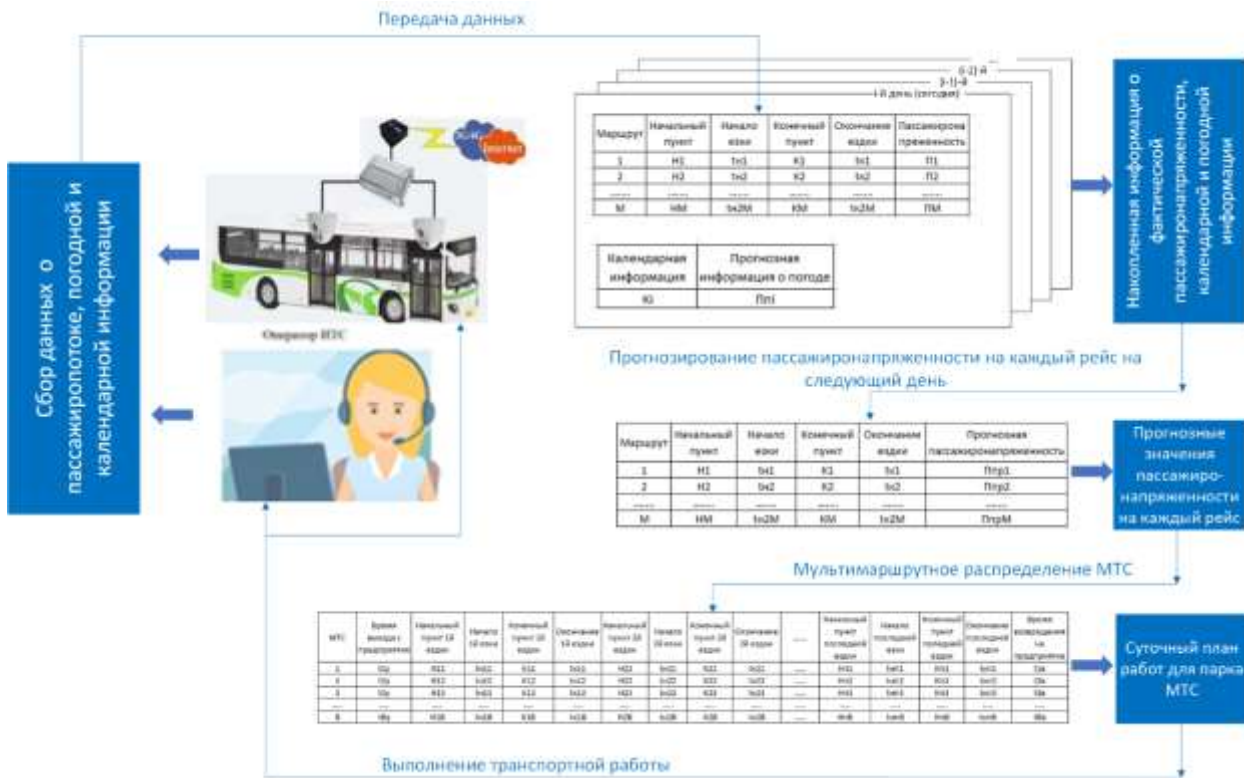


Рис. 1. Интеллектуальная система мультимаршрутного планирования работы МТС

2. Этап прогнозирования – на основе агрегированных на этапе 1 исторических данных формируется прогноз пассажиронапряженности на каждый рейс на следующий день. Для прогнозирования при этом рекомендуются методы интеллектуального анализа данных: нейронные сети, случайный лес, бустинг деревьев, метод случайных векторов [29, стр. 45, 30, стр. 11]. Результаты прогноза представляется в табличном формате, где для каждого из  $M$  маршрутов указываются: начальный (Н) и конечный пункты (К), время начала ( $t_n$ ) и окончания рейса ( $t_k$ ), а также прогнозные значения пассажиронапряженности ( $P_{пр}$ ). Данный прогноз служит основой для реализации мультимаршрутного метода на следующем этапе.

3. Мультимаршрутное распределение МТС – формирование суточного плана работ для каждого из  $B$  МТС. План представляет собой расширенную таблицу, где для каждой единицы МТС определяется цепочка рейсов, которые

оно должно выполнить в течение дня. Для каждого такого рейса указывается начальный пункт (Н), время начала рейса ( $t_n$ ), конечный пункт (К) и время окончания рейса ( $t_k$ ). Таблица завершается временем возвращения транспортного средства на предприятие. После этого выполняется переход на этап 1.

Таким образом, схема демонстрирует замкнутый цикл управления: от сбора первичных данных и прогнозирования спроса до построения оптимизированных суточных заданий для парка МТС с учетом ежесуточных особенностей и связанных с этим колебаний пассажиропотоков. Внедрение подобной системы способствует переходу к более гибкому и адаптивному управлению перевозками, повышению уровня обслуживания пассажиров и эффективности использования ресурсов транспортного предприятия. Кроме того, указанная схема позволяет реализовывать потенциал МТС динамической вместимости [31, 32]

### **Оценка экономического эффекта от внедрения интеллектуальной системы мультимаршрутного планирования работы МТС**

Создание предлагаемой интеллектуальной системы управления требует начальных инвестиций, включающих в себя:

- разработку программного обеспечения и алгоритмов оптимизации;
- установку датчиков и оборудования для сбора данных;
- интеграцию с существующими диспетчерскими системами;
- обучение персонала.

Соответствующие исследования показали, что для города с 35 тысячами жителей, 10 маршрутами и парком из 13 автобусов, стоимость создания интеллектуальной системы мультимаршрутного планирования работы МТС оценивается в 300 000 BYN (или около 100 тыс. USD). Согласно приведенным выше расчетам (табл. 1) экономический эффект от создания такой системы

равен 279 BYN в сутки (около 93 USD). Тогда срок окупаемости составит  $(300000 / 279) / 365 \approx 3$  года.

### Выводы

Таким образом, инвестиции в интеллектуальную систему управления окупаются за период, не превышающий трех лет, после чего система начинает генерировать чистую прибыль. Дополнительные выгоды от внедрения системы:

1. Снижение загрузки дорог – использование МТС меньшей вместимости, в том числе, в перспективе – МТС динамической вместимости, позволяет сократить общую "тяжесть" транспортного потока и снизить воздействие на дорожную сеть.

2. Гибкость управления – возможность оперативного перераспределения ресурсов при изменении условий, включая реагирование на чрезвычайные ситуации.

3. Масштабируемость – система может быть адаптирована для городов различного размера и конфигурации маршрутной сети.

4. Экологические преимущества – более активное использование МТС меньшей вместимости (в перспективе – МТС динамической вместимости), имеющих меньший расход топлива по сравнению с автобусами большой вместимости, позволяет уменьшить объем вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу.

### Список источников

1. Аземша, С. А. Некоторые пути решения транспортных проблем городов Республики Беларусь / С. А. Аземша, В. С. Стрельченко // Наука - образованию, производству, экономике : Материалы 12-й Международной научно-технической конференции: в 4 томах, Минск, 29–31 мая 2014 года. Том 3. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2014. – С. 220-222. – EDN UVJWSI.

2. Аземша, С. А. Анализ способов решения транспортных проблем городов стран Северной и Южной Америки / С. А. Аземша, В. С. Стрельченко // Вестник

Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2014. – № 1(28). – С. 45-51. – EDN OJRMZQ.

3. Аземша, С. А. Оптимизация расписания движения пассажирского транспорта регулярного сообщения с учетом дублируемости маршрутов / С. А. Аземша, И. Н. Кравченя. – Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2025. – 175 с. – ISBN 978-985-891-197-3. – EDN GKGEFA.

4. Azemsha, S. A method for assessing the automobilization impact on population morbidity / S. Azemsha, D. Kapski, P. Pegin // Transportation Research Procedia, Saint Petersburg, 27–29 сентября 2018 года. Vol. 36. – Saint Petersburg: Elsevier B.V., 2018. – P. 18-24. – DOI 10.1016/j.trpro.2018.12.037. – EDN APECGZ.

5. Azemsha, S. A. Parameters of automobilization in the Republic of Belarus and their impact on greenhouse gas emissions / S. A. Azemsha // Ecologica. – 2019. – No. 94. – P. 217-223. – EDN VWYKIR.

6. Аземша, С. А. Обоснование направления развития пассажирского транспорта в Республике Беларусь / С. А. Аземша, В. М. Морозов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2022. – № 3. – С. 78-84. – EDN FLNNLY.

7. Min, H. Assessing the efficiency of mass transit systems in the United States : MNTRC Report 12-63 / H. Min ; Mineta National Transit Research Consortium. – San José (CA), 2017. – 32 p. – URL: <https://transweb.sjsu.edu/sites/default/files/1235-assessing-the-efficiency-of-mass-transit-systems-in-the-united-states.pdf> (дата обращения: 16.01.2026).

8. Al-Omar, M. Analysing public transport performance / M. Al-Omar. – 2013. – URL: <https://www.muthar-alomar.com/wp-content/uploads/2013/01/Analysing-Public-Transport-Performance.pdf> (дата обращения: 16.01.2026).

9. Karlaftis, M. G. Efficiency measurement in public transport: are findings specification sensitive? / M. G. Karlaftis, D. Tsamboulas // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2012. – Vol. 46, No. 2. – P. 392-402.

10. Fedujwar, R. Performance assessment of public transport routes: A framework using revealed data / R. Fedujwar, A. Agarwal // Research in Transportation Business and Management. – 2025. – Vol. 59. – P. 101283. – DOI 10.1016/j.rtbm.2024.101283. – EDN QIOCNT.

11. Sundber, K. Methods for assessing public transport performance : 05.22.01: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / K. Sundberg ; KTH Royal Institute of Technology. School of Architecture and the Built Environment. – Stockholm, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. – Текст на англ. яз. – URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:572705/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 16.01.2026).

12. Аземша, С. А. Статистическое исследование окупаемости работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения / С. А. Аземша, Д. В. Капский // Вестник

Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2020. – № 11. – С. 70-77. – EDN MNBJRI.

13. Аземша, С. А. Разработка предложений по повышению эффективности работы общественного городского пассажирского транспорта / С. А. Аземша // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16, № 5(69). – С. 544-557. – DOI 10.26518/2071-7296-2019-5-544-557. – EDN MLLTMC.

14. Аземша, С. А. Обоснование оптимальной вместимости модуля в составе пассажирского транспортного средства для регулярных городских перевозок / С. А. Аземша // Транспорт Урала. – 2023. – № 2(77). – С. 71-78. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-2-71-78. – EDN RMSUJJ.

15. Аземша, С. А. Исследование закономерностей в транспортных предпочтениях анализом результатов транспортного опроса / С. А. Аземша, В. М. Морозов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 5(87). – С. 638-653. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-5-638-653. – EDN НХНВМЕ.

16. Аземша, С. А. Обоснование целесообразности выравнивания интервалов движения пассажирских транспортных средств регулярного сообщения на дублирующих участках / С. А. Аземша // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2023. – № 3(65). – С. 40-47. – EDN LYGXBC.

17. Scheduling technique of route vehicles on duplicating stretches / S. Azemsha, I. Kravchenya, Y. Vovk [et al.] // Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Transport. – 2021. – Vol. 113. – P. 5-16. – DOI 10.20858/SJSUTST.2021.113.1. – EDN GNYAYL.

18. Аземша, С. А. Совершенствование методики оптимизации расписания движения пассажирского транспорта регулярного сообщения применением метода линейной свертки / С. А. Аземша // Современные технологии в транспортной отрасли : Сборник статей Международной научно-технической конференции, Новополюцк, 25–26 апреля 2024 года. – Новополюцк: Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2024. – С. 128-134. – EDN EUXNRL.

19. Аземша, С. А. Совершенствование оптимизации расписания движения городского пассажирского транспорта регулярного сообщения обоснованием ранжирования дублирующих участков / С. А. Аземша // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2025. – № 3(73). – С. 27-33. – EDN ZBCUDK

20. Azemsha, S. The Study of the Trolley Buses Occupancy / S. Azemsha // Global Journal of Management and Business Research: F Real Estate, Event and Tourism Management. – 2019. – Vol. 19, Issue 1. – P. 6-15. – URL: [https://globaljournals.org/GJMBR\\_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf](https://globaljournals.org/GJMBR_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf).

21. Аземша, С. А. Исследование наполняемости автобусов при городских перевозках пассажиров в г. Могилеве / С. А. Аземша, Т. В. Грищенко, О. О. Ясинская //

Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2020. – № 11. – С. 62-69. – EDN AORRRK.

22. Azemsha, S. The Study of Public Transport Occupancy Rate Patterns in Belarusian cities / S. Azemsha, D. Kapski // International Journal of Engineering Inventions. – 2022. – Vol. 11, Issue 12. – P. 128-134. – URL: <https://ijeijournal.com/papers/Vol11-Issue12/1112128134.pdf>.

23. Аземша, С. А. Исследование наполняемости автобусов при городских перевозках пассажиров в г. Светлогорске / С. А. Аземша, Т. В. Грищенко, О. О. Ясинская // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика, математика, информатика. – 2019. – № 5(118). – С. 37-40. – EDN EDOIWY.

24. Аземша, С. А. Совершенствование технологии работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения / С. А. Аземша // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 3(97). – С. 396-411. – DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-3-396-411. – EDN FIDYXY.

25. Аземша, С. А. Мультимаршрутный метод организации работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения / С. А. Аземша // Перспективы развития транспортного комплекса : Материалы IX Международной научно-практической конференции, Минск, 12–14 октября 2024 года. – Минск: БелНИИТ «Транстехника», 2024. – С. 180-186. – EDN XEGHOU.

26. Аземша, С. А. Обоснование целесообразности и постановка задачи мультимаршрутной организации работы пассажирских транспортных средств регулярного сообщения / С. А. Аземша // Прогрессивные технологии в транспортных системах : Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Оренбург, 20–22 ноября 2024 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2025. – С. 12-20. – EDN UEKUUD.

27. Аземша, С. А. Мультимаршрутный метод организации работы транспортных средств / С. А. Аземша // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2025. – Т. 22, № 1(101). – С. 38-53. – DOI 10.26518/2071-7296-2025-22-1-38-53. – EDN XJRPEO.

28. Аземша, С. А. Повышение эффективности пассажирских перевозок городским транспортом регулярного сообщения с учетом колебаний пассажиропотока / С. А. Аземша, С. Ю. Янкович // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 1(47). – С. 65-70. – DOI 10.52928/2070-1616-2023-47-1-65-70. – EDN JNLFEB.

29. Аземша, С. А. Оценка потенциала повышения окупаемости работы городского пассажирского транспорта ежедневным прогнозированием пассажиронапряженности / С. А. Аземша, С. Ю. Янкович, А. И. Петров // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные

науки. – 2023. – № 2(48). – С. 41-49. – DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-41-49. – EDN KJIGBD.

30. Аземша, С. А. Оценка эффективности ежесуточного управления парком модульных пассажирских транспортных средств на городских регулярных маршрутах / С. А. Аземша, С. Ю. Янкович // Недропользование и транспортные системы. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 4-17. – DOI 10.18503/SMTS-2024-14-1-4-17. – EDN GYNTXN.

31. An Intelligent Multi-Depot Vehicle Routing and Management Model for Smart Cities / D. Saxena, N. Singh, K. Gupta [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2025. – Vol. 26, No. 6. – P. 7740-7754. – DOI 10.1109/tits.2025.3557826. – EDN YPAHNN.

32. Spatiotemporal Patterns and Drivers of Urban Traffic Carbon Emissions in Shaanxi, China / Y. Qian, Ju. Zeng, W. Hao [et al.] // Land. – 2025. – Vol. 14, No. 7. – P. 1355. – DOI 10.3390/land14071355. – EDN WAIGQS.

33. A collaborative bi-level optimization approach for smart logistics: Depot location and unmanned aerial vehicle-based pickup-delivery services / Yu. Zheng, W. Gai, J. Zhang, M. Zhong // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2026. – Vol. 165. – P. 113453. – DOI 10.1016/j.engappai.2025.113453. – EDN QCCHIG.

34. Dauer, A. T. Variable fixing heuristics for solving multiple depot vehicle scheduling problem with heterogeneous fleet and time windows / A. T. Dauer, B. De. A. Prata // Optimization Letters. – 2021. – Vol. 15, No. 1. – P. 153-170. – DOI 10.1007/s11590-020-01577-0. – EDN WQEOZO.

35. Solving a Large-Scale Multi-Depot Vehicle Scheduling Problem in Urban Bus Systems / X. Xu, Ye. Zhirui, J. Li, C. Wang // Mathematical Problems in Engineering. – 2018 – Vol. 2018, No. 1. – P. 4868906. – DOI 10.1155/2018/4868906.

36. Marín, C. Constructive matheuristic algorithms for solving the multidepot vehicle scheduling problem for public transportation / C. Marín, R. Bolaños, F. Escobar // Revista Espacios. – 2020. – Vol. 41, No. 27.

37. Multi-objective optimization model for a multi-depot Mixed fleet electric vehicle scheduling problem with real-world constraints / J. Duda, M. Karkula, R. Puka [et al.] // Transport Problems. – 2022. – Vol. 17, No. 4. – P. 137-149. – DOI 10.20858/tp.2022.17.4.12. – EDN MWALGW.

38. Zhang, J. Optimizing Single-Depot Vehicle Scheduling Problem: Fixed-Interval Model and Algorithm / J. Zhang, W. Li, F. Qiu // Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2015. – Vol. 19, No. 3. – P. 215-224. – DOI 10.1080/15472450.2013.836930. – EDN XYOSDR.

39. Kliewer, N. A time–space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling / N. Kliewer, T. Mellouli, L. Suhl // European Journal of Operational Research. – 2006. – Vol. 175, No. 3. – P. 1616-1627. – DOI 10.1016/j.ejor.2005.02.030.

40. Донской, П. On demand: адаптивные маршруты общественного транспорта / П. Донской, П. Малахальцев // Городские исследования и практики. – 2019. – Т. 4, № 4(17). – С. 93-125. – DOI 10.17323/usp44201993-125. – EDN OEDOBV.
41. Grahn, R. Improving the performance of first- and last-mile mobility services through transit coordination, real-time demand prediction, advanced reservations, and trip prioritization / R. Grahn, S. Qian, Ch. Hendrickson // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2021. – Vol. 133. – P. 103430. – DOI 10.1016/j.trc.2021.103430. – EDN PRDTLA.
42. On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment / J. Alonso-Mora, S. Samaranayake, A. Wallar, E. Frazzoli, D. Rus // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 114, No. 3. – P. 462-467.
43. Leena, A. Solving urban transit route design problem using selection hyper-heuristics / A. Leena, Ch. Mumford, A. Kheiri // European Journal of Operational Research. – 2019. – Vol. 274, No. 2. – P. 545-559.
44. Public transport network optimisation in PTV Visum using selection hyper-heuristics / Ph. Heyken Soares, L. Ahmed, Y. Mao, Ch. L. Mumford // Public Transport. – 2021. – Vol. 13, No. 1. – P. 163-196. – DOI 10.1007/s12469-020-00249-7. – EDN XGVHTS.
45. Sistuk, V. Urban Mobility Modeling in PTV Visum with Various Options for Bus Fare Structure / V. Sistuk // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. – 2025. – Vol. 53, No. 2. – P. 135-145. – DOI 10.3311/pptr.37809. – EDN PTOLIH.
46. Аземша, С. А. Дорожный пассажирский транспорт динамической вместимости: история появления и перспективы развития / С. А. Аземша // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2024. – № 3(69). – С. 28-50. – EDN LSSYTM.
47. Siarhei, A. Flexible Capacity Road Passenger Transport: History, Current, Future / A. Siarhei // International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies. – 2024. – Vol. 4, No. 5. – P. 899-914. – DOI 10.62225/2583049x.2024.4.5.3342. – EDN KTKZNT.

### References

1. Azemsha S.A., Strel'chenko V.S. *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike*, Materialy konferentsii, Minsk, Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskiy universitet, 2014, vol. 3, pp. 220-222.
2. Azemsha S.A., Strel'chenko V.S. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport*, 2014, no. 1(28), pp. 45-51.
3. Azemsha S.A., Kravchenya I. N. *Optimizatsiya raspisaniya dvizheniya passazhirskogo transporta regul'yarnogo soobshcheniya s uchetom dubliruyemosti marshrutov* (Optimization of Regular Passenger Transport Schedules Taking into Account Route Duplication), Gomel', Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta, 2025, 175 p., ISBN 978-985-891-197-3.

4. Azemsha S., Kapski D., Pegin P. *Transportation Research Procedia*, Saint Petersburg, Elsevier B.V., 2018, vol. 36, pp. 18-24, doi 10.1016/j.trpro.2018.12.037.
5. Azemsha S.A. *Ecologica*, 2019, no. 94, pp. 217-223.
6. Azemsha S.A. Morozov V.M. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki*, 2022, no.3, pp. 78-84.
7. Min H. Assessing the efficiency of mass transit systems in the United States: MNTRC Report 12-63, available at: <https://transweb.sjsu.edu/sites/default/files/1235-assessing-the-efficiency-of-mass-transit-systems-in-the-united-states.pdf> (16.01.2026).
8. Al-Omar M. Analysing public transport performance, 2013, available at: <https://www.muthar-alomar.com/wp-content/uploads/2013/01/Analysing-Public-Transport-Performance.pdf> (16.01.2026).
9. Karlaftis M.G., Tsamboulas D. Efficiency measurement in public transport: are findings specification sensitive? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012, vol. 46, no. 2, pp. 392-402.
10. Fedujwar R., Agarwal A. Performance assessment of public transport routes: A framework using revealed data, *Research in Transportation Business and Management*, 2025, vol. 59, p. 101283, doi 10.1016/j.rtbm.2024.101283.
11. Sundber K. Methods for assessing public transport, Doctor's thesis, Stockholm, 2012, available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:572705/FULLTEXT01.pdf> (16.01.2026).
12. Azemsha S.A., Kapskiy D.V. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki*, 2020, no. 11, pp. 70-77.
13. Azemsha S.A. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2019, vol. 16, no. 5(69), pp. 544-557, doi 10.26518/2071-7296-2019-5-544-557.
14. Azemsha S.A. *Transport Urala*, 2023, no. 2(77), pp. 71-78, doi 10.20291/1815-9400-2023-2-71-78.
15. Azemsha S.A., Morozov V. M. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2022, vol. 19, no. 5(87), pp. 638-653, doi 10.26518/2071-7296-2022-19-5-638-653.
16. Azemsha S.A. *Tekhniko-tehnologicheskiye problemy servisa*, 2023, no. 3(65), pp. 40-47.
17. Azemsha S., Kravchenya I., Vovk Y., Lyashuk O., Vovk I. Scheduling technique of route vehicles on duplicating stretches, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Transport*, 2021, vol. 113, pp. 5-16, doi 10.20858/SJSUTST.2021.113.1.
18. Azemsha S.A. *Sovremennyye tekhnologii v transportnoy otrasli*, Sbornik statey, Novopolotsk, Polotskiy gosudarstvennyy universitet imeni Yevfrosinii Polotskoy, 2024, pp. 128-134.

19. Azemsha S.A. *Tekhniko-tekhnologicheskiye problemy servisa*, 2025, no. 3(73), pp. 27-33.
20. Azemsha S. The Study of the Trolley Buses Occupancy, *Global Journal of Management and Business Research: F Real Estate, Event and Tourism Management*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 6-15, available at: [https://globaljournals.org/GJMBR\\_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf](https://globaljournals.org/GJMBR_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf).
21. Azemsha S.A., Grishchenko T.V., Yasinskaya O.O. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki*, 2020, no. 11, pp. 62-69.
22. Azemsha S., Kapski D. The Study of Public Transport Occupancy Rate Patterns in Belarusian cities, *International Journal of Engineering Inventions*, 2022, vol. 11, no. 12, pp. 128-134, available at: <https://ijejournal.com/papers/Vol11-Issue12/1112128134.pdf>.
23. Azemsha S.A., Grishchenko T.V., Yasinskaya O.O. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fizika, matematika, informatika*, 2019, no. 5(118), pp. 37-40.
24. Azemsha S.A. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2024, vol. 21, no 3(97), pp. 396-411, doi 10.26518/2071-7296-2024-21-3-396-411.
25. Azemsha S.A. *Perspektivy razvitiya transportnogo kompleksa*, Materialy konferentsii, Minsk, BelNIIT «Transtekhnika», 2024, pp. 180-186.
26. Azemsha S.A. *Progressivnyye tekhnologii v transportnykh sistemakh*, Materialy konferentsii, Orenburg, Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet, 2025, pp. 12-20.
27. Azemsha S.A. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2025, vol. 22, no. 1(101), pp. 38-53, doi 10.26518/2071-7296-2025-22-1-38-53.
28. Azemsha S.A., Yankovich S.Yu. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki*, 2023, no. 1(47), pp. 65-70, doi 10.52928/2070-1616-2023-47-1-65-70.
29. Azemsha S.A., Yankovich S.Yu., Petrov A.I. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki*, 2023, no. 2(48), pp. 41-49, doi 10.52928/2070-1616-2023-48-2-41-49.
30. Azemsha S.A., Yankovich S.Yu. *Nedropol'zovaniye i transportnyye sistemy*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 4-17, doi 10.18503/SMTS-2024-14-1-4-17.
31. Saxena D., Singh N., Gupta K., Verma A., Mishra V., Kumar J., Gupta I., Patni S., Gupta R., Kumar Ja., Singh A.K An Intelligent Multi-Depot Vehicle Routing and Management Model for Smart Cities, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, vol. 26, no. 6, p. 7740-7754, doi 10.1109/tits.2025.3557826.
32. Qian Y., Zeng Ju., Hao W., Wei Xu., Yang M., Zhang Zh., Liu H. Spatiotemporal Patterns and Drivers of Urban Traffic Carbon Emissions in Shaanxi, China, *Land*, 2025, vol. 14, no. 7, pp. 1355, doi 10.3390/land14071355.

33. Zheng Yu., Gai W., Zhang J., Zhong M. A collaborative bi-level optimization approach for smart logistics: Depot location and unmanned aerial vehicle-based pickup-delivery services, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2026, vol. 165, p. 113453, doi 10.1016/j.engappai.2025.113453.
34. Dauer A.T., De B., Prata A. Variable fixing heuristics for solving multiple depot vehicle scheduling problem with heterogeneous fleet and time windows, *Optimization Letters*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 153-170, doi 10.1007/s11590-020-01577-0.
35. Xu X., Zhirui Ye., Li J., Wang C. Solving a Large-Scale Multi-Depot Vehicle Scheduling Problem in Urban Bus Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, vol. 2018, no. 1, p. 4868906, doi 10.1155/2018/4868906.
36. Marín C., Bolaños R., Escobar F. Constructive matheuristic algorithms for solving the multidepot vehicle scheduling problem for public transportation, *Revista Espacios*, 2020, Vol. 41, No. 27.
37. Duda J., Karkula M., Puka R., Skalna I., Fierek S., Redmer A., Kisielewski P. Multi-objective optimization model for a multi-depot Mixed fleet electric vehicle scheduling problem with real-world constraints, *Transport Problems*, 2022, vol. 17, no. 4, pp. 137-149, doi 10.20858/tp.2022.17.4.12.
38. Zhang J., Li W., Qiu F. Optimizing Single-Depot Vehicle Scheduling Problem: Fixed-Interval Model and Algorithm, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2015, vol. 19, no. 3, pp. 215-224, doi 10.1080/15472450.2013.836930.
39. Kliwer N., Mellouli T., Suhl L. A time-space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling, *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 175, no. 3, pp. 1616-1627, doi 10.1016/j.ejor.2005.02.030.
40. Donskoy P., Malakhal'tsev P. *Gorodskiye issledovaniya i praktiki*, 2019, vol. 4, no. 4(17), pp. 93-125, doi 10.17323/usp44201993-125.
41. Grahn R., Qian S., Hendrickson Ch. Improving the performance of first- and last-mile mobility services through transit coordination, real-time demand prediction, advanced reservations, and trip prioritization, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, vol. 133, p. 103430, doi 10.1016/j.trc.2021.103430.
42. Alonso-Mora J., Samaranayake S., Wallar A., Frazzoli E., Rus D. On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, vol. 114, no. 3, pp. 462-467.
43. Leena A., Mumford Ch., Kheiri A. Solving urban transit route design problem using selection hyper-heuristics, *European Journal of Operational Research*, 2019, vol. 274, no. 2, pp. 545-559.
44. Heyken Soares Ph., Ahmed L., Mao Y., Mumford Ch. L. Public transport network optimisation in PTV Visum using selection hyper-heuristics, *Public Transport*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 163-196, doi 10.1007/s12469-020-00249-7.

45. Sistuk V. Urban Mobility Modeling in PTV Visum with Various Options for Bus Fare Structure, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2025, vol. 53, no. 2, pp. 135-145, doi 10.3311/pptr.37809.
46. Azemsha S.A. *Tekhniko-tekhnologicheskiye problemy servisa*, 2024, no. 3(69), pp. 28-50.
47. Siarhei A. Flexible Capacity Road Passenger Transport: History, Current, Future, *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*, 2024, vol. 4, no. 5, pp. 899-914, doi 10.62225/2583049x.2024.4.5.3342.

Рецензент: Д.В. Енин, канд. техн. наук, доц., директор ООО «Институт прикладных транспортных исследований»

### *Информация об авторе*

**Аземша Сергей Александрович**, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Управление автомобильными перевозками и дорожным движением», БелГУТ.

### *Information about the author*

**Azemsha Sergey A.**, Candidate of Sciences (Technical), associate professor, Head of the Department of " Road Transport and Traffic Management" of BelSUT.

*Статья поступила в редакцию 19.01.2026; одобрена после рецензирования 26.01.2026; принята к публикации 23.03.2026.*

*The article was submitted 19.01.2026; approved after reviewing 26.01.2026; accepted for publication 23.03.2026.*