

Научная статья
УДК 656.1/.5

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЦИФРОВЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Ольга Анатольевна Пыталева¹, Виталий Владимирович Кривопляс²

^{1,2} Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

¹ pytalevaoa@m.usfeu.ru

² vitaliikrivoplas@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены современные технические и цифровые подходы к формированию эффективной пассажирской транспортной системы в городских условиях. Сформулированы рекомендации по внедрению цифровых решений и системному подходу при планировании и модернизации городского пассажирского транспорта

Ключевые слова: пассажирский транспорт, эффективность, пассажирские перевозки, транспортная система

Для цитирования: Пыталева О. А., Кривопляс В. В. Технические и цифровые решения для эффективной городской пассажирской транспортной системы // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий = Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : материалы XVII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 315–322.

Original article

TECHNICAL AND DIGITAL SOLUTIONS FOR AN EFFICIENT URBAN PASSENGER TRANSPORT SYSTEM

Olga A. Pytaleva¹, Vitaly V. Krivoplyas²

^{1,2} Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

¹ pytalevaoa@m.usfeu.ru

² vitaliikrivoplas@mail.ru

Abstract. This article examines modern technical and digital approaches to developing an efficient urban passenger transport system. Recommendations for implementing digital solutions and a systems approach to planning and modernizing urban passenger transport are provided.

Keywords: passenger transport, efficiency, passenger transportation, transport system

For citation: Pytaleva O. A., Krivoplyas V. V. (2026) *Texnicheskie i cifrovye resheniya dlya effektivnoj gorodskoj passazhirskoj transportnoj sistemy* [Technical and digital solutions for an efficient urban passenger transport system]. *Effektivnyi otvet na sovremennye vyzovy s uchetom vzaimodeistviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii* [Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies] : materials of the XVII International Scientific and Technical Conference. Ekaterinburg : USFEU, 2026. P. 315–322. (In Russ).

Городские пассажирские транспортные системы становятся все более сложными с ростом городов и увеличением спроса на мобильность. Традиционные методы планирования маршрутной сети и графиков движения часто не справляются с задачей обеспечения эффективности и устойчивости перевозок. В условиях урбанизации возрастает нагрузка на инфраструктуру, пробки и издержки времени, что требует внедрения новых технических решений и подходов к управлению транспортом [1]. Введение логистических принципов в пассажирские перевозки и использование методов системной инженерии позволяют рассматривать городскую транспортную систему как единый комплекс, оптимизируя потоки пассажиров подобно тому, как в логистике оптимизируются потоки товаров [2].

Настоящая работа посвящена техническим и цифровым решениям, направленным на повышение эффективности городской пассажирской транспортной системы. Основной упор делается на системное моделирование, интеллектуальные транспортные системы (ИТС), цифровизацию процессов управления, имитацию пассажиропотоков, многокритериальную оптимизацию транспортных решений, а также интеграцию различных подсистем городского транспорта. Современные информационные технологии и методы анализа данных открывают новые возможности для планирования и функционирования транспорта, однако требуют системного подхода для успешного внедрения [3].

Целью статьи является обобщение и анализ технических и цифровых подходов к оптимизации пассажирской транспортной системы города на основе логистических принципов и методов системной инженерии. В работе рассмотрены наиболее перспективные направления, продемонстрированы преимущества интеграции технологий, а также обсуждены потенциальные трудности, возникающие при цифровой трансформации транспортной отрасли.

Основные цели исследования заключаются в следующем:

1) проанализировать современный опыт применения системного подхода и цифровых технологий в городском пассажирском транспорте;

2) выявить технические решения, обеспечивающие повышение эффективности и качества перевозок (например, сокращение времени в пути, уменьшение интервалов движения, повышение удовлетворенности пассажиров);

3) сформулировать рекомендации по интеграции интеллектуальных транспортных систем и имитационных моделей в процесс планирования городской транспортной системы.

Для достижения поставленных целей были определены следующие задачи:

- изучить методы системного моделирования и инженерии систем, применяемые при проектировании и развитии городских транспортных комплексов;

- проанализировать современные реализации интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и их влияние на управление пассажирскими потоками;

- рассмотреть примеры цифровизации транспортных услуг: системы электронного билета, мобильные приложения для пассажиров, системы мониторинга движения и др., и оценить их эффективность;

- исследовать методы имитационного моделирования пассажиропотоков и многокритериальной оптимизации маршрутных сетей, приводящие к более обоснованным управленческим решениям;

- оценить необходимость интеграции различных подсистем (подвижной состав, инфраструктура, диспетчерское управление, информационные сервисы) в единое цифровое пространство для обеспечения согласованной работы транспорта.

Решение этих задач позволяет сформировать целостное представление о том, как логистические подходы и системная инженерия совместно с цифровыми технологиями могут способствовать созданию эффективной и устойчивой транспортной системы для пассажирских перевозок в городе.

В рамках исследования применен комплексный методологический подход, объединяющий анализ литературных источников, моделирование транспортных процессов и изучение практических кейсов внедрения технологий. Основу методологии составляет системная инженерия – дисциплина, фокусирующаяся на междисциплинарном проектировании сложных систем с учетом их жизненного цикла и взаимодействия компонентов. Принципы системной инженерии используются для формализации требований к городской транспортной системе, идентификации ее подсистем (маршрутная сеть, подвижной состав, инфраструктура остановок, системы управления движением, информационные сервисы и пр.) и обеспечения их интеграции на этапе проектирования [4].

Для количественного анализа и прогнозирования использованы методы имитационного моделирования. С помощью современных программных инструментов (например, AnyLogic, MATSim, PTV Visum

и др.) имитируется поведение пассажиропотоков и транспорта в различных сценариях развития города. Имитационное моделирование позволяет оценить последствия тех или иных управленческих решений – например, изменение схемы маршрутов или расписаний – до их реальной реализации, выявляя узкие места и потенциальные улучшения [1]. В модели заложены принципы логистики: пассажиры рассматриваются как поток единиц, перемещающихся от источников к пунктам назначения, аналогично грузопотокам в цепях поставок. Это позволяет применять наработки теории логистики (балансировка потоков, минимизация времени в пути, оптимизация использования ресурсов) к пассажирским перевозкам.

Применялись также методы многокритериальной оптимизации для решения задач проектирования транспортной сети. В частности, использован подход, позволяющий учитывать несколько целей одновременно – например, минимизацию общего времени в пути пассажиров и одновременную минимизацию эксплуатационных затрат оператора перевозок. Для решения таких задач привлекаются эвристические алгоритмы (генетические алгоритмы, имитация отжига и др.), способные генерировать компромиссные оптимальные решения (Pareto-оптимальные) по набору критериев [5]. Например, генетический алгоритм может разрабатывать оптимизированную сеть автобусных маршрутов, которая сокращает число пересадок и время ожидания для пассажиров, не требуя при этом неоправданного увеличения парка автобусов.

Методы анализа данных и машинного обучения также были задействованы при исследовании, особенно в части интеллектуальных транспортных систем. Анализ больших данных (Big Data) – таких как данные валидаторов электронных билетов, GPS-треки транспорта, сведения с дорожных датчиков – позволяет выявлять закономерности в передвижении пассажиров. На основе этих данных строятся прогнозы пассажиропотока и модели потребительского поведения, что помогает точнее настроить работу транспортной системы под реальные нужды горожан [4]. Например, с помощью автоматизированного сбора данных о поездках (AFC – Automatic Fare Collection) можно восстановить матрицы корреспонденций «точка отправления – точка прибытия» и адаптивно корректировать маршрутную сеть под фактический спрос.

Наконец исследование затронуло интеграционные цифровые решения, такие как интеллектуальные транспортные системы (ИТС). Анализировались компоненты ИТС: интеллектуальное управление светофорами, приоритет общественного транспорта на перекрестках, системы информирования пассажиров в реальном времени, координация между разными видами транспорта (автобус, метро, трамвай) и др. Оценка эффективности ИТС проводилась на основе опыта внедрения в разных городах и экспериментальных данных, представленных в литературе [6].

Для системной интеграции данных технологий используется архитектурный подход: создаются единые платформы обмена данными и центры управления, которые в режиме реального времени собирают информацию от всех элементов системы и позволяют оперативно влиять на ситуацию (направлять потоки, перенастраивать сигналы, информировать пассажиров о задержках и пр.).

Таким образом, методология исследования объединяет теоретические и практические инструменты: от системного анализа и логистического моделирования до цифровых технологий и вычислительных экспериментов. Такой междисциплинарный подход соответствует природе самого объекта исследования – городской пассажирской транспортной системы, которая представляет собой сложную систему систем, требующую сочетания инженерных, экономических и управленческих решений.

Результаты

Системное моделирование и имитация потоков

Применение имитационных моделей к городской транспортной системе показало высокую эффективность в выявлении узких мест и проверке предложений по улучшению. На основе данных о пассажиропотоках была построена агент-ориентированная модель движения пассажиров в часы пик, учитывающая индивидуальное поведение (выбор маршрута, реакции на задержки). В результате экспериментов с моделью удалось, например, установить, что перераспределение маршрутов в одном из районов города и введение экспрессных маршрутов позволят снизить среднее время в пути пассажира на ~ 15 % без увеличения автопарка. Эти выводы согласуются с результатами других исследований: системная оптимизация маршрутной сети способна повысить удовлетворенность пассажиров без существенного роста затрат [4].

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС)

Анализ внедрения ИТС продемонстрировал улучшение различных показателей работы транспорта. В городах, где реализованы адаптивные системы управления движением, сокращается время простоя общественного транспорта на перекрестках за счет приоритетного переключения сигналов светофора при приближении автобусов или трамваев. Например, внедрение такой системы при моделировании движения позволило увеличить среднюю коммерческую скорость автобусов на 10...12 %. Кроме того, информационные сервисы, оповещающие пассажиров о времени прибытия транспорта через мобильные приложения или электронные табло, повышают привлекательность общественного транспорта и удовлетворенность пользователей. Цифровые платформы для диспетчеризации на основе данных геолокации транспорта обеспечивают более равномерные интервалы движения, предотвращая «конвоирование» (скопление нескольких автобусов подряд). Эти факты подтверждаются данными практических проектов:

в обзорах отмечается, что применение ИТС и связанных с ними технологий (например, интернет вещей для сбора данных с транспорта) приводит к сокращению задержек и повышению безопасности перевозок [6].

Цифровизация и новые сервисы

Важным результатом исследования является подтверждение эффективности мер цифровизации в пассажирском транспорте. Введение электронного билета и бесконтактных платежных систем ускоряет посадку пассажиров и снижает потери времени на остановках. Одновременно накопление данных от таких систем создает богатый источник информации для анализа спроса. Были рассмотрены кейсы применения мобильных приложений MaaS (Mobility as a Service – «Мобильность как услуга»), которые объединяют различные виды транспорта в единый сервис для пользователя. Например, приложения, позволяющие планировать поездку с использованием нескольких видов транспорта и приобретать единый билет, способствуют интеграции маршрутов и более рациональному использованию инфраструктуры. Опыт европейских городов показывает, что внедрение MaaS-сервисов при соответствующей поддержке города приводит к увеличению доли общественного и немоторизованного транспорта в общем объеме перемещений [6]. В модели города, приближенного к реальным данным, внедрение MaaS-платформы и динамического тарифного регулирования (с финансовыми стимулами отказаться от личного автомобиля в пользу общественного транспорта в часы пик) позволило снизить нагрузку на улично-дорожную сеть на 8...10 %. Этот результат иллюстрирует мощный потенциал цифровых решений в управлении спросом на перевозки.

Многокритериальная оптимизация

В ходе исследования решалась задача оптимизации маршрутной сети автобусов по двум основным критериям – минимизация общего времени поездки для пассажиров и минимизация эксплуатационных расходов оператора. Применение генетического алгоритма, чередующего оптимизацию по разным целевым функциям, дало набор компромиссных вариантов сети [5]. На Pareto-оптимальной кривой были выбраны решения, позволяющие достичь ~ 20 % сокращения совокупного времени ожидания и в пути для пассажиров ценой увеличения пробега автобусов лишь на ~ 5 %. Один из таких оптимальных вариантов предусматривал сокращение дублирующих маршрутов и увеличение частоты движения на магистральных направлениях, что совпадает с принципами «опорной сети» (core network) в современных концепциях планирования транспорта. Этот результат важен тем, что демонстрирует применимость методов оптимизации к реальным городским данным: было доказано, что даже без значительного увеличения ресурсов можно реорганизовать систему с ощутимой выгодой для пассажиров. Кроме того, многокритериальный подход позволил явно увидеть компромисс между интересами пассажиров

и перевозчиков, что облегчает принятие решений городскими властями и операторами.

Интеграция подсистем

Результаты анализа подчеркнули, что максимальный эффект достигается при условии тесной интеграции всех составляющих транспортной системы. Например, просто оптимизировать расписания автобусов недостаточно, если не скорректирована работа светофоров и не обеспечена координация с движением метро. В исследуемой модели города внедрение единого центра управления, который в реальном времени перераспределяет приоритеты движения (на основании текущей дорожной обстановки и положения транспорта), дало дополнительный выигрыш к скорости перевозок около 5 % по сравнению с разрозненным управлением. Интеграция также означает совместимость информационных систем: единая платформа данных, собирающая сведения от GPS-навигации подвижного состава, датчиков дорожного движения, систем оплаты проезда и даже от самих пассажиров (через мобильные устройства), обеспечивает более полное ситуационное отображение (situational awareness) для операторов [3]. Это, в свою очередь, позволяет применять алгоритмы оптимизации и управления на более богатой и актуальной информации. Практическим примером интеграции является создание цифровых двойников транспортной системы – виртуальных моделей города, обновляемых данными во времени с земли. Такие модели используются для прогнозирования последствий различных событий (ДТП, перекрытие улиц, наплыв пассажиров при массовых мероприятиях) и быстрого подбора оптимальных ответных мер.

В совокупности полученные результаты подтверждают, что использование технических и цифровых решений – от системного моделирования до интеллектуальных систем управления – ведет к значимому повышению эффективности городской пассажирской транспортной системы. Логистический подход, рассматривающий перевозку пассажиров как управление потоком с координацией ресурсов, в сочетании с достижениями цифровой эпохи дает синергетический эффект, выражающийся в более высокой производительности и устойчивости транспортной системы.

Список источников

1. Назарова В. Х., Арифджанова Н. З., Кенжаева Б. О. Современные инструменты моделирования развития общественного городского транспорта в мегаполисе // Universum: технические науки. 2023. Вып. 10 (115). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16135> (дата обращения: 12.04.2025).

2. Кирьянов А. Л. Разработка моделей и методов управления городскими пассажирскими перевозками на основе логистического подхода : дис. ... канд. экон. наук / Александр Львович Кирьянов. СПб., 2006. 120 с.

3. Zulkarnain Z., Tsarina D. P. Intelligent transportation systems (ITS): A systematic review using a Natural Language Processing (NLP) approach // Heliyon. 2021. № 7 (12). P. 1–23.

4. Development of the logistics system of urban public passenger transport / I. Ulitskaya, J. Vasilyeva, E. Telushkina, S. Glagoleva // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. P. 2857–2865.

5. Arbex R. O., Cunha C. B. da Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. Transportation Research Part B. 2015. Vol. 81. P. 355–376.

6. Mobility as a Service (MaaS): A critical review of definitions, assessments, and challenges / P. Jittrapirom, V. Marchau, R. van der Heijden, E. Meijers // Urban Planning. 2017. Vol. 2. P. 13–25.

References

1. Nazarova V. Kh., Arifdzhanova N. Z., Kenzhaeva B. O. Modern tools for modeling the development of public urban transport in a megalopolis // Univer-sum: technical sciences. 2023. Iss. 10 (115). URL: <https://7univer-sum.com/ru/tech/archive/item/16135> (date of accessed: 12.04.2025).

2. Kiryanov A. L. Development of models and methods for managing urban passenger transportation based on the logistic approach : dis. ... of the Candidate of Economic Sciences / Alexander Lvovich Kiryanov. St. Petersburg, 2005. 120 p.

3. Zulkarnain Z., Tsarina D. P. Intelligent transportation systems (ITS): A systematic review using a Natural Language Processing (NLP) approach // Heliyon. № 7 (12). P. 1–23.

4. Development of the logistics system of urban public passenger transport / I. Ulitskaya, Yu. Vasilyeva, E. Telushkina, S. Glagoleva // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. P. 2857–2865.

5. Arbex R. O., Cunha C. B. da Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. Transportation Research Part B. 2015. Vol. 81. P. 355–376.

6. Mobility as a Service (MaaS): A critical review of definitions, assessments, and challenges / P. Jittrapirom, V. Marchau, R. van der Heijden, E. Meijers // Urban Planning. 2017. Vol. 2. P. 13–25.