

Оптимизация загруженности городских пассажиропотоков в условиях интеллектуализации управления транспортными системами: методика и математическая модель

Бондаренко Андрей Олегович

Канд. экон. наук, начальник учебного центра технических средств таможенного контроля
ORCID: 0000-0003-4785-0937, e-mail: a_o_bond@mail.ru

Российская таможенная академия, г. Люберцы, Россия

Аннотация

Проанализированы возможности и определены условия интеллектуализации управления транспортными системами. Целью настоящего исследования является разработка концептуальной модели интеллектуальной системы управления городскими транспортными пассажиропотоками, математической модели и методики оптимизации загруженности городских пассажиропотоков в условиях интеллектуализации управления транспортными системами. Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью научно-методического обеспечения для решения прикладной задачи анализа и оптимизации загруженности городских пассажиропотоков при перераспределении транспортных средств с наименее загруженного маршрута на маршрут с наибольшей нагрузкой, позволяющего доказательно реализовать комплекс мероприятий, связанных с интеллектуализацией управления транспортными системами. Задачами исследования являются оценка загруженности пассажиропотоков (нагрузки транспортных систем) на различных маршрутах, моделирование перемаршрутизации транспортных средств с транспортной системы с низкой нагрузкой в транспортную систему с высокой нагрузкой в целях оптимизации загруженности пассажиропотоков, оценка эффектов оптимизации загруженности городских пассажиропотоков. Методология исследования основывается на положениях теории массового обслуживания, экономико-статистических и экспертно-аналитических методах. В результате моделирования систем массового обслуживания доказано, что загруженность городских пассажиропотоков является оптимальной в диапазоне значений, близких к равенству общей интенсивности поступающего и убывающего пассажиропотока.

Ключевые слова

Оптимизация, пассажиропоток, транспорт, транспортная система, методика, математическая модель, система массового обслуживания, управление, Интернет вещей, искусственный интеллект, интеллектуализация, интеллектуальная система

Для цитирования: Бондаренко А.О. Оптимизация загруженности городских пассажиропотоков в условиях интеллектуализации управления транспортными системами: методика и математическая модель // Вестник университета. 2025. № 10. С. 72-81.

Optimization of urban passenger flows congestion in the context of intelligent management of transport systems: methodology and mathematical model

Andrey O. Bondarenko

Cand. Sci. (Econ.), Head of the Training Center for Technical means of Customs Control
ORCID: 0000-0003-4785-0937, e-mail: a_o_bond@mail.ru

Russian Customs Academy, Lyubertsy, Russia

Abstract

The possibilities and the conditions for transport system management intellectualization have been analyzed and determined. The purpose of the study is to develop a conceptual model of an intelligent urban passenger flows management system, a mathematical model, and a methodology for optimizing urban passenger flows congestion in the context of intelligent management of transport systems. The relevance of the study is due to the need for scientific and methodological support to solve the applied problem of analyzing and optimizing urban passenger flows congestion when redistributing vehicles from the least busy route to the route with the highest load. It allows for the evidence-based implementation of a set of measures related to transport system management intellectualization. The objectives of the study are to assess passenger flows congestion (the load of transport systems) on various routes, to create a model of vehicles re-routing from a low-load transport system to a high-load one in order to optimize passenger flows congestion, and to evaluate the effects of optimizing urban passenger flows congestion. The research methodology is based on the provisions of the queuing theory and economic-statistical and expert-analytical methods. Due to modeling queuing systems, it has been proved that urban passenger flows congestion is optimal in a range of values close to equality of the total intensity of incoming and outgoing passenger flow.

Keywords

Optimization, passenger flow, transport, transport system, methodology, mathematical model, queuing system, management, Internet of things, artificial intelligence, intellectualization, intelligent system

For citation: Bondarenko A.O. (2025) Optimization of urban passenger flows congestion in the context of intelligent management of transport systems: methodology and mathematical model. *Vestnik universiteta*, no. 10, pp. 72-81.



ВВЕДЕНИЕ

В условиях стратегических изменений, определенных Транспортной стратегией Российской Федерации (далее – РФ, Россия) до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г., утвержденной распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р, транспортный комплекс городских агломераций должен модернизироваться с учетом тенденций цифровизации и интеллектуализации сферы предоставления транспортных услуг. В целях повышения управляемости городскими транспортными системами в условиях интенсивно меняющейся внешней среды и пассажиропотока на современном этапе управление бизнес-процессами в сфере общественного транспорта будет эффективным с внедрением интеллектуальных транспортных систем. Так, «интеллектуальные транспортные системы (все виды транспорта, включая городскую сеть общественного транспорта)» являются одним из стратегических направлений цифровизации транспортного комплекса, в рамках которого ключевой задачей представляется «управление сетью городского общественного транспорта, включая обеспечение приоритета движения общественного транспорта – управление городскими потоками»¹.

В научном сообществе вопросам регулирования сферы общественного транспорта посвящены отдельные результаты. Так, в трудах А.В. Сычевой, Я.В. Никитиной, И.Ю. Лим рассмотрены направления интеллектуализации транспортной сети и системы управления пассажирскими перевозками [1; 2]. Методы математического моделирования, в том числе модели систем массового обслуживания (далее – СМО), в исследованиях транспортной проблемы применили А.А. Манаков, С.А. Коларж, Е.М. Саломатов, М.А. Матальцкий, А.А. Кочетков, Е.А. Хвостова, Ю.А. Андрусенко, В.В. Драгуленко, К.А. Ковалева, М.В. Кравцова [3–7]. Однако на сегодняшний день в недостаточной степени исследована проблема интеллектуализации управления транспортными системами, в основе которой лежат методические средства и математические инструменты (модели) оптимизации загруженности городских пассажиропотоков. В связи с этим решение вышеуказанной проблемы является важной научной задачей, направленной на достижение цели, связанной с удовлетворением потребностей получателей транспортных услуг – жителей городских агломераций.

Цель настоящего исследования заключается в разработке концептуальной модели интеллектуальной системы управления городскими транспортными пассажиропотоками, математической модели и методики оптимизации загруженности городских пассажиропотоков в условиях интеллектуализации управления транспортными системами, в основе которых лежат положения теории массового обслуживания, используемые для обоснования целесообразности перераспределении транспортных средств (далее – ТС) с наименее загруженного маршрута на маршрут с наибольшей нагрузкой.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ

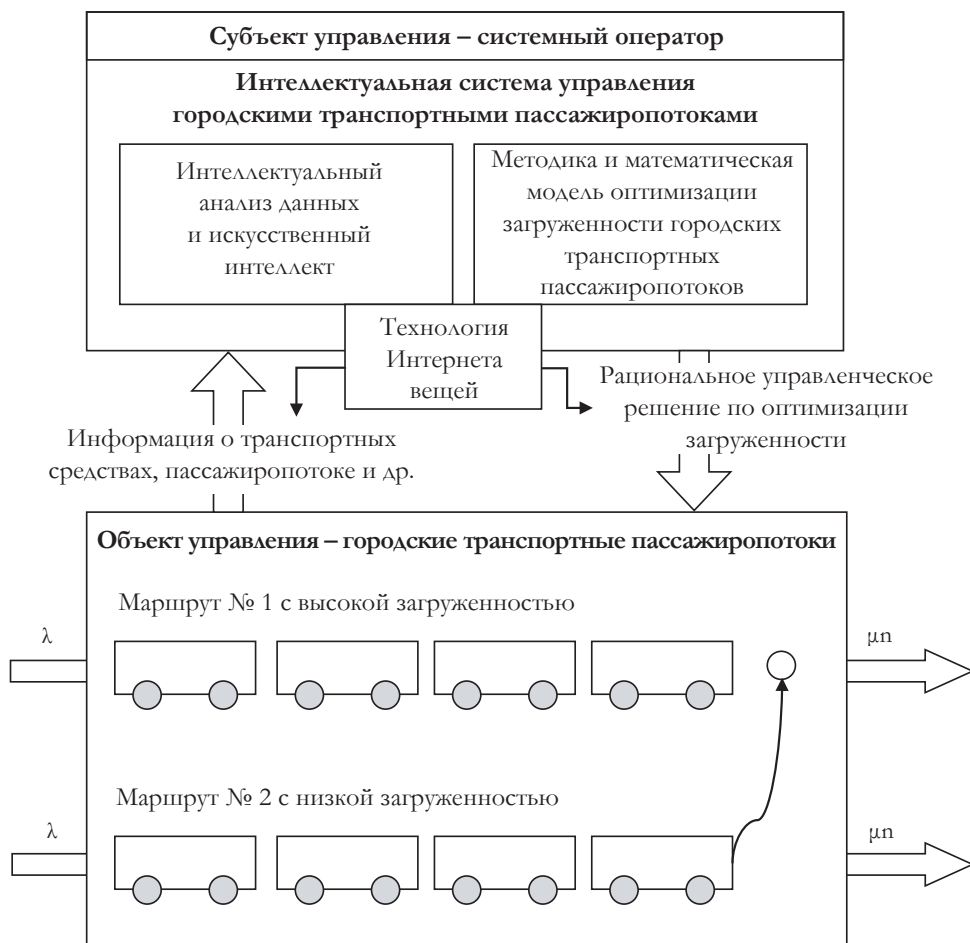
В условиях высокого спроса на услуги в сфере общественного транспорта, обусловленного ростом населения городских агломераций, в связи с необходимостью создания транспортно-логистических технологий в управление общественным транспортом актуальным является внедрение интеллектуальной системы управления городскими транспортными пассажиропотоками (далее – ИС).

ИС – это информационная система, которая с помощью цифровых технологий Интернета вещей, интеллектуального анализа данных и искусственного интеллекта, позволяет в режиме реального времени анализировать информацию о пассажиропотоке в городском транспорте и поддерживать автоматизированное принятие рационального управленческого решения по оптимизации его загруженности за счет перераспределения или выделения дополнительных ТС на маршрутах городской транспортной сети. Она, анализируя пассажиропоток на общественном транспорте по маршрутам города посредством получения информации от системы ГЛОНАСС-мониторинга и счетчиков пассажиропотока, реализует механизм автоматизированной поддержки принятия управленческих решений в условиях загруженности пассажиропотоков города. На основе полученной информации ИС формирует возможные варианты решений по оптимизации загруженности пассажиропотока на выбранном маршруте, которые передает системному оператору для принятия управленческого решения по оптимизации загруженности маршрутов. Оценка ситуации, связанной с городским пассажиропотоком, в режиме реального времени позволит запустить процесс оптимизации загруженности маршрутов. При выявлении факта количества пассажиров

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года». Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/?ysclid=m93v2y3hcv63935256 (дата обращения: 09.04.2025).

выше установленной нормы в городском транспорте ИС предложит основные решения по введению дополнительного транспорта либо перераспределению ТС с наименее загруженных маршрутов на загруженные. Смена маршрута происходит в режиме реального времени после положительного решения системного оператора о перемаршрутизации в ИС, которая автоматически присвоит номер загруженного маршрута выделенному ТС, отразив его в информационном табло.

Концептуальная модель, отражающая принцип работы ИС, представлена на рис. 1.



Составлено автором по материалам исследования

Рис. 1. Концептуальная модель, отражающая принцип работы ИС

Принципиальная новизна инновационного проекта по созданию ИС заключается в возможной интеграции искусственного интеллекта в устройство городского общественного транспорта. Разработка также позволит применить принцип перехода к плоским организационным структурам управления и минимизирует участие человека в модернизации пассажиропотоков города, поскольку автоматизирует процесс принятия управленческих решений в условиях транспортного коллапса [8].

Для технической обоснованности проекта разработана математическая модель и методика оптимизации загруженности городских пассажиропотоков в условиях интеллектуализации управления транспортными системами.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАГРУЖЕННОСТИ ГОРОДСКИХ ПАССАЖИРОПОТОКОВ

В настоящем исследовании транспортная система представлена совокупностью ТС одного вида и класса (автобусов, троллейбусов и т.п.), которые перевозят пассажиров в рамках одного маршрута от пункта А до пункта В (в одном направлении) и, соответственно, классифицируется как многоканальная СМО. Каждое ТС представляет собой отдельный канал обслуживания – n . По дисциплине обслуживания исследуемую систему следует характеризовать как СМО с ограниченной очередью, поскольку ТС имеют ограничения по вместимости пассажиров. С этой точки зрения общая предельная вместимость ТС является

ограничением очереди – m . При достижении значения данного показателя пассажиры получают отказ в перевозке (фактически ввиду полной загруженности ТС пассажирами). Таким образом, транспортная система представляет собой n -канальную СМО с ограниченной очередью.

В таблице приведены основные показатели СМО для анализа загруженности городских пассажиропотоков.

Таблица

Математический аппарат анализа загруженности городских пассажиропотоков

Наименование показателя	Показатель (расчетная формула)
Количество ТС на маршруте	n
Оптимальная вместимость одного ТС, чел.	B_{O1} – нижнее значение B_{O2} – верхнее значение
Общая оптимальная вместимость ТС на маршруте, чел.	$B_{O\text{ общ. }1} = B_{O1} \cdot n$ – нижнее значение $B_{O\text{ общ. }2} = B_{O2} \cdot n$ – верхнее значение
Предельная вместимость одного ТС, чел.	B_{II}
Общая предельная вместимость ТС на маршруте, чел.	$B_{II\text{ общ.}} = B_{II} \cdot n = m$
Общая интенсивность пассажиропотока, заполняющего ТС на маршруте, чел./ч	λ
Интенсивность пассажиропотока, убывающего из одного ТС на маршруте, чел./ч	μ
Общая интенсивность пассажиропотока, убывающего из ТС на маршруте, чел./ч	μn
Коэффициент использования ТС на маршруте	$\rho = \lambda / \mu$
Вероятность отсутствия пассажиров в ТС на маршруте	$p_0 = (1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^{n+1}(1 - (\frac{\rho}{n})^m)}{n \cdot n!(1 - \frac{\rho}{n})})^{-1}$, при $\rho/n \neq 1$
	$p_0 = (1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} + m \frac{\rho^n}{n!})^{-1}$, при $\rho/n = 1$
Загруженность пассажиропотока – среднее число пассажиров, находящихся в ТС на маршруте, чел.	$L_{Oч} = \frac{\rho^{n+1}}{n \cdot n!} \cdot \frac{1 - (\frac{\rho}{n})^m (m+1 - m \frac{\rho}{n})}{(1 - \frac{\rho}{n})^2} p_0$, при $\rho/n \neq 1$
	$L_{Oч} = \frac{\rho^n}{n!} \cdot \frac{(m+1)m}{2} p_0$, при $\rho/n = 1$

Примечание: математический аппарат адаптирован для решения прикладной задачи по оптимизации загруженности городских пассажиропотоков

Составлено автором по материалам источника [9]

На основании представленных в таблице показателей и формул для определения оптимальной нагрузки на транспортную систему производится расчет ключевого показателя $L_{Oч}$ при разных значениях n . $L_{Oч}$ определена средним числом пассажиров, фактически находящихся в ТС на маршруте, и является индикатором загруженности пассажиропотока – нагрузки на транспортную систему по следующим диапазонам: высокая нагрузка – $[B_{O\text{ общ. }1}; B_{O\text{ общ. }2}] < L_{Oч} \leq B_{II\text{ общ.}}$, оптимальная нагрузка – $L_{Oч} \in [B_{O\text{ общ. }1}; B_{O\text{ общ. }2}]$, низкая нагрузка – $L_{Oч} < [B_{O\text{ общ. }1}; B_{O\text{ общ. }2}]$, где $\rightarrow [B_{O\text{ общ. }1}; B_{O\text{ общ. }2}]$ – диапазон оптимальной нагрузки.

В целях определения предельной и оптимальной вместимости одного ТС был проведен опрос респондентов – 20 водителей городских автобусов. Результаты экспертно-аналитического моделирования показали, что вне зависимости от модели автобуса большого класса значение предельной вместимости пассажиров имеет незначительные колебания и является приблизительно одинаковым. Так, в среднем фактическая предельная вместимость автобуса составляет 105 чел., в то время как, по мнению экспедитора,

наиболее оптимальным значением вместимости пассажиров для передвижения ТС является 65–75 чел. В связи с этим установлены постоянные величины вне зависимости от n -транспортной системы:

- $B_{\Pi} = 105$ чел. (*const*);
- $B_{O1} = 65$ чел. (*const*);
- $B_{O2} = 75$ чел. (*const*).

Для математической модели 9-транспортной системы установлены следующие вводные данные:

- $n = 9$ ТС;
- $\lambda = 4$ тыс. чел./ч (*const*);
- $\mu n = 3,591$ тыс. чел./ч.

Для математической модели 9-транспортной системы представлен расчет показателей и определена $L_{Oч}$ (1):

- $\mu = 399$ чел./ч (*const*);
- $m = B_{\Pi \text{ общ.}} = 945$ чел.;
- $B_{O \text{ общ. } 1} = 585$ чел.;
- $B_{O \text{ общ. } 2} = 675$ чел.;
- $\rho = 4$ тыс. / $399 \approx 10,02506$;

$$p_0 = (1 + 10,02506 + \frac{10,02506^2}{2!} + \dots + \frac{10,02506^9}{9!} + \frac{10,02506^{9+1}(1 - (\frac{10,02506}{9})^{945})}{9 \cdot 9!(1 - \frac{10,02506}{9})})^{-1} \approx 1,96 \times 10^{-49};$$

$$L_{Oч} = \frac{10,02506^{9+1}}{9 \cdot 9!} \cdot \frac{1 - (\frac{10,02506}{9})^{945} (945 + 1 - 945 \frac{10,02506}{9})}{(1 - \frac{10,02506}{9})^2} \cdot 1,96 \times 10^{-49} \approx 936 \text{ (чел.)}. \quad (1)$$

Значение $L_{Oч}$ попадает в диапазон значений $[B_{O \text{ общ. } 1}; B_{O \text{ общ. } 2}] < L_{Oч} \leq B_{\Pi \text{ общ.}}$, определяющих высокую нагрузку транспортной системы. Таким образом, разработанная математическая модель позволяет оценить загруженность городских пассажиропотоков в транспортной системе.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ЗАГРУЖЕННОСТИ ГОРОДСКИХ ПАССАЖИРОПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ

В целях решения прикладной задачи по оптимизации загруженности городских пассажиропотоков разработана методика, позволяющая обосновать необходимость введения дополнительного транспорта или перераспределения ТС с одного наименее загруженного маршрута на другой, более загруженный. При этом перемаршрутизация ТС должна повышать эффективность их использования как на первом, так и на втором маршрутах. В основе методики лежит разработанная и представленная ранее математическая модель, позволяющая оценить нагрузку на транспортную систему.

Постановка задач методики изложена ниже:

- оценка загруженности пассажиропотоков – нагрузки транспортных систем на различных маршрутах;
- моделирование перемаршрутизации ТС с транспортной системы с низкой нагрузкой в транспортную систему с высокой нагрузкой в целях оптимизации загруженности пассажиропотоков;
- оценка эффектов оптимизации загруженности городских пассажиропотоков.

Решение задач методики представлено далее.

1. Решение задачи 1. В рамках ранее представленной математической модели оптимизации загруженности городских пассажиропотоков произведены расчеты на примере транспортной системы с высокой нагрузкой. Итоговые расчеты в рамках первого маршрута представлены ниже:

- $n = 9$ ТС;
- $\lambda = 4$ тыс. чел./ч (*const* – для первого маршрута);
- $\mu n = 3,591$ тыс. чел./ч;
- $\mu = 399$ чел./ч (*const* – для первого маршрута);
- $m = 945$ чел.;
- $[B_{O \text{ общ. } 1}; B_{O \text{ общ. } 2}] = [585; 675]$;

- $\rho = 10,02506$;
- $\rho_0 = 1,96 \cdot 10^{-49}$;
- $L_{\text{оч}} = 936$ чел.;
- $[585; 675] < [L_{\text{оч}} = 936] \leq 945$ – высокая нагрузка транспортной системы на маршруте.

Далее представлены вводные данные для математической модели 4-транспортной системы с низко загруженным пассажиропотоком для второго маршрута:

- $n = 4$ ТС;
- $\lambda = 900$ чел. / час (*const* – для второго маршрута);
- $\mu n = 1,192$ тыс. чел./ч;

Расчет показателей и определение ЛОЧ:

- $\mu = 298$ чел./ч (*const* – для второго маршрута);
- $m = 420$ чел.;
- $[B_{\text{общ. 1}}; B_{\text{общ. 2}}] = [260; 300]$;
- $\rho = 900 / 298 \approx 3,02013$;

$$p_0 = (1 + 3,02013 + \frac{3,02013^2}{2!} + \dots + \frac{3,02013^4}{4!} + \frac{3,02013^{4+1}(1 - (\frac{3,02013}{4})^{420})}{4 \cdot 4!(1 - \frac{3,02013}{4})})^{-1} \approx 0,03660 ;$$

$$L_{\text{оч}} = \frac{3,02013^{4+1}}{4 \cdot 4!} \cdot \frac{1 - (\frac{3,02013}{4})^{420} (420 + 1 - 420 \frac{3,02013}{4})}{(1 - \frac{3,02013}{4})^2} \cdot 0,03660 \approx 1,6 \text{ (чел.)}; \quad (2)$$

- $[L_{\text{оч}} = 1,6] < [260; 300]$ – низкая нагрузка транспортной системы на маршруте.

Представленные математические модели для транспортных систем по двум разным маршрутам отражают, что одна система перегружена, а другая имеет низкую загруженность пассажиропотока.

2. Решение задачи 2. В связи с тем, что 9-транспортная система на первом маршруте является высокозагруженной, а 4-транспортная система на втором маршруте – низкозагруженной, далее представлены расчеты для математических моделей первой и второй систем с учетом рациональной перемаршрутизации ТС в целях оптимизации загруженности пассажиропотоков. При этом с учетом перераспределения ТС значение n в первой системе увеличится, во второй – сократится.

Итоговые расчеты для 10-транспортной системы в рамках первого маршрута представлены ниже:

- $n = 10$ ТС;
- $\lambda = 4$ тыс. чел./ч;
- $\mu = 399$ чел./ч;
- $\mu n = 3,99$ тыс. чел./ч;
- $m = 1,05$ тыс. чел.;
- $[B_{\text{общ. 1}}; B_{\text{общ. 2}}] = [650; 750]$;
- $\rho = 4000 / 399 \approx 10,02506$;

$$p_0 = (1 + 10,02506 + \frac{10,02506^2}{2!} + \dots + \frac{10,02506^{10}}{10!} + \frac{10,02506^{10+1}(1 - (\frac{10,02506}{10})^{1050})}{10 \cdot 10!(1 - \frac{10,02506}{10})})^{-1} \approx 6,88 \times 10^{-8} ;$$

$$L_{\text{оч}} = \frac{10,02506^{10+1}}{10 \cdot 10!} \cdot \frac{1 - (\frac{10,02506}{10})^{1050} (1050 + 1 - 1050 \frac{10,02506}{10})}{(1 - \frac{10,02506}{10})^2} \cdot 6,88 \times 10^{-8} \approx 732 \text{ (чел.)}; \quad (3)$$

- $[L_{\text{оч}} = 732] \in [650; 750]$ – оптимальная нагрузка транспортной системы на маршруте.

Итоговые расчеты для 3-транспортной системы в рамках второго маршрута представлены ниже:

- $n = 3$ ТС;
- $\lambda = 900$ чел./ч;
- $\mu = 298$ чел./ч;
- $\mu n = 894$ чел./ч;
- $m = 315$ чел.;

- $[B_{\text{Общ. 1}}; B_{\text{Общ. 2}}] = [195; 225]$;
- $\rho = 900 / 298 \approx 3,02013$;

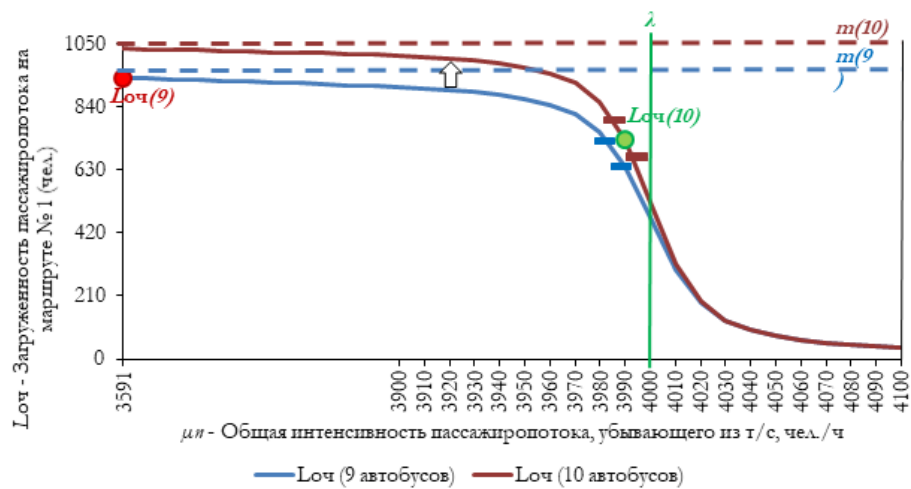
$$p_0 = (1 + 3,02013 + \frac{3,02013^2}{2!} + \frac{3,02013^3}{3!} + \frac{3,02013^{3+1}(1 - (\frac{3,02013}{3})^{315})}{3 \cdot 3!(1 - \frac{3,02013}{3})})^{-1} \approx 0,00020;$$

$$L_{\text{оч}} = \frac{3,02013^{3+1}}{3 \cdot 3!} \cdot \frac{1 - (\frac{3,02013}{3})^{315} (315 + 1 - 315 \frac{3,02013}{3})}{(1 - \frac{3,02013}{3})^2} \cdot 0,00020 \approx 209 \text{ (чел.)}; \quad (4)$$

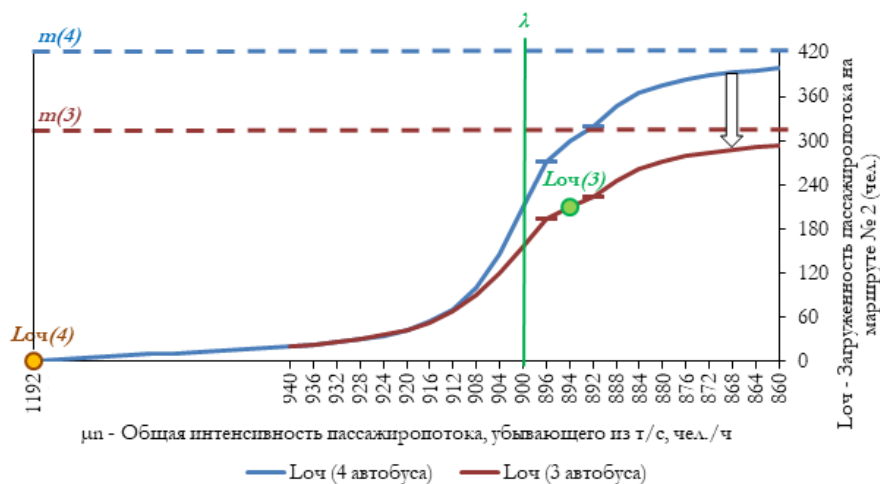
- $[L_{\text{оч}} = 209] \in [195; 255]$ – оптимальная нагрузка транспортной системы на маршруте.

Представленные математические модели по двум разным маршрутам отражают, что перемаршрутизация ТС с высокозагруженной системы в низкозагруженную привела к оптимальной нагрузке транспортных систем.

3. Решение задачи 3. По результатам оптимизации загруженности городских пассажиропотоков представлена оценка эффектов по первому и второму маршрутам от перемаршрутизации ТС (рис. 2а и 2б).



(а)



(б)

Составлено автором по материалам исследования

Рис. 3. Оценка эффектов оптимизации загруженности городских пассажиропотоков

Оценка эффектов оптимизации загруженности городских пассажиропотоков за счет перемаршрутизации ТС с системы с низкой нагрузкой в систему с высокой отражает повышение эффективности работы систем. С точки зрения физики фактические значения нагрузки и первой, и второй транспортных систем

пришли в диапазон значений, определяющих оптимальную загруженность пассажиропотоков. С точки зрения экономики рациональное использование потенциалов транспортных систем позволит произвести перевозку большего числа пассажиров, что обосновано снижением вероятности полной загруженности ТС в первой системе, и, следовательно, принести перевозчику больший доход от оплаты проезда.

Кроме того, исходя из графических данных, представленных на рис. 2а и 2б, доказательно обосновано, что загруженность городских транспортных пассажиропотоков является оптимальной в диапазоне значений, близких к равенству общей интенсивности поступающего (λ) и убывающего (μ_n) пассажиропотоков. Однако следует отметить, что математическая модель является достаточно чувствительной в пределах данного диапазона в силу того, что не учитывает изменения общей интенсивности поступающего и убывающего пассажиропотоков во времени, а работает с фиксированными фактическими данными в режиме реального времени. При этом использование алгоритмов машинного обучения и интеллектуального анализа данных, интегрированных в ИС, позволит в режиме онлайн анализировать распределенную во времени информацию о пассажиропотоках, что обеспечит практическое применение разработанных методических средств и модели.

Разработанная методика позволяет решать прикладные задачи по оптимизации загруженности городских пассажиропотоков в условиях интеллектуализации транспортных систем, а также обосновать необходимость введения дополнительного транспорта или перераспределения ТС с одного наименее загруженного маршрута на другой более загруженный, произвести оценку эффектов от перемаршрутизации ТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования автор приходит к следующим выводам.

1. Разработана концептуальная модель интеллектуальной системы управления городскими транспортными пассажиропотоками, определяющая возможности и условия интеллектуализации управления транспортными системами городских агломераций. Интеллектуальная система основана на применении цифровых технологий Интернета вещей, интеллектуального анализа данных и искусственного интеллекта, последовательное применение которых с использованием математических алгоритмов позволит принимать рациональные управленческие решения по оптимизации пассажиропотоков в городском транспорте.

2. Адаптирован математический аппарат теории массового обслуживания для анализа загруженности городских пассажиропотоков, позволяющий производить расчеты показателей, определяющих нагрузку транспортных систем.

3. Разработана математическая модель оптимизации загруженности городских пассажиропотоков, основанная на положениях теории массового обслуживания и позволяющая производить оценку нагрузки транспортных систем с разным количеством ТС и интенсивностью пассажиропотоков на различных маршрутах городской транспортной сети.

4. Разработана методика оптимизации загруженности городских пассажиропотоков в условиях интеллектуализации управления транспортными системами, позволяющая доказательно обосновать целесообразность перераспределения ТС с наименее загруженного маршрута на маршрут с наибольшей нагрузкой. В результате моделирования СМО доказано, что загруженность городских пассажиропотоков является оптимальной в диапазоне значений, близких к равенству общей интенсивности поступающего и убывающего пассажиропотока. При этом оптимизационные инструменты в сфере общественного транспорта должны применяться с использованием интеллектуальных систем, позволяющих эффективно осуществлять сбор, обработку и интеллектуальный анализ данных с применением цифровых технологий и искусственного интеллекта в режиме, приближенному к реальному времени, что позволит повысить качество предоставляемых транспортных услуг.

Список литературы

1. Сычева А.В., Никитина Я.В. Внедрение интеллектуальной транспортной системы для повышения эффективности транспортной деятельности на территории Волгоградской области. Вестник Волжского института экономики, педагогики и права. 2023;2:85–96.
2. Лим И.Ю. Расчет экономической целесообразности и оптимизации количества рейсов автобусов с учетом цифровой трансформации системы управления пассажирскими перевозками. Вестник Забайкальского государственного университета. 2021;1(27):104–111. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-1-104-111>

3. Манаков А.А., Коларж С.А., Саломатов Е.М. Алгоритм корректировки количества и класса пассажирских транспортных средств на основе данных пассажиропотока. Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024;1(68):13–21. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2024_68_13
4. Маталыцкий М.А. Об имитационном моделировании НМ-сетей, применяемых в транспортной логистике. Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. 2019;2(9):143–148.
5. Кочетков А.А. Системы массового обслуживания с периодическими функциями интенсивностей потоков на транспорте. Экономика. Бизнес. Банки. 2024;1(71):36–51.
6. Хвостова Е.А., Андрусенко Ю.А., Драгуленко В.В., Ковалева К.А. Теория массового обслуживания в управлении городскими транспортными системами. Прикладные экономические исследования. 2024;1:60–67. <https://doi.org/10.47576/2949-1908.2024.1.1.007>
7. Кравцова М.В. Построение экономико-математической модели системы массового обслуживания на примере организации движения маршрутных автобусов. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Экономика и управление. 2018;2(33):11–16. <https://doi.org/10.18323/2221-5689-2018-2-11-16>
8. Макрусев В.В., Бондаренко А.О. Комплексная методика анализа эффективности функционирования организационных структур управления в условиях оптимизации иерархии. Вестник университета. 2023;1:23–35. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2023-1-23-35>
9. Плескунов М.А. Теория массового обслуживания: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета; 2022. 264 с.

References

1. Sycheva A.V., Nikitina Ya.V. Implementation of an intelligent transport system to improve the efficiency of transport activities in the Volgograd region. Bulletin of the Volga Institute of Economics, Pedagogy and Law. 2023;2:85–96. (In Russian).
2. Lim I.Yu. Calculation of economic feasibility and optimization of the number of bus flights taking into account the digital transformation of the passenger transportation control system. Bulletin of the Trans-Baikal State University. 2021;1(27):104–111. (In Russian). <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-1-104-111>
3. Manakov A.L., Kolarzh S.A., Salomatov E.M. Algorithm for adjusting the number and class of passenger vehicles based on passenger traffic data. Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport. 2024;1(68):13–21. (In Russian). https://doi.org/10.52170/1815-9265_2024_68_13
4. Matalytski M.A. On the imitation modeling of HM-network applied in transport logistics. Bulletin of the Yanka Kupala Grodno State University. Mathematics. Physics. Computer science, computer engineering and management. 2019;2(9):143–148. (In Russian).
5. Kochetkov A.A. Queuing systems with harmonic functions flow intensity. Economy. Business. Banks. 2024;1(71):36–51. (In Russian).
6. Khvostova E.A., Andrusenko Y.A., Dragulenko V.V., Kovaleva K.A. The theory of queuing in the management of urban transport systems. Applied economic research. 2024;1:60–67. (In Russian). <https://doi.org/10.47576/2949-1908.2024.1.1.007>
7. Kravtsova M.V. The formulation of the economic and mathematical model of serving system on the example of public transport bus traffic management. Vector of Science of Tolyatti State University. Series: Economics and Management. 2018;2(33):11–16. (In Russian). <https://doi.org/10.18323/2221-5689-2018-2-11-16>
8. Makrusev V.V., Bondarenko A.O. A comprehensive methodology for analyzing the effectiveness of organizational management structures' performance amidst hierarchy optimization. Bulletin of the University. 2023;1:23–35. (In Russian). <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2023-1-23-35>
9. Pleskunov M.A. Theory of queuing: tutorial. Ekaterinburg: Ural University Publ. House; 2022. 264 p. (In Russian).