

УДК 04.942:625.7

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.47.4.010](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.47.4.010)

Нейросетевое моделирование пропускной способности улично-дорожной сети

А.С. Сысоев[✉], А.К. Погодаев, В.Э. Клявин, С.В. Жихорева, Г.С. Боровкова

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация

Резюме. Проблемы увеличения количества личных транспортных средств в городских агломерациях, а также возрастание грузоперевозок приводят к необходимости применения интеллектуальных транспортных систем для построения стратегий по уменьшению заторов и предотвращению аварий. Важным параметром транспортной системы, показывающим эффективность использования существующей городской инфраструктуры, является пропускная способность планируемого маршрута. Статья посвящена созданию модели пропускной способности городского маршрута на основе пропускной способности его элементов, а именно перегонов и перекрестков. Подход к созданию такой модели – математическое ремоделирование, где в качестве унифицированного класса выбрана классическая нейронная сеть обратного распространения, аппроксимирующая модели различных классов. Для формирования наборов данных при обучении модели предлагается использовать индекс пропускной способности маршрута. На численных примерах показана возможность применения предложенного подхода. Оценена пропускная способность трех планируемых маршрутов и выбран оптимальный, критерием эффективности которого является отношение объема транспортного потока к пропускной способности. Перспективной задачей представленного исследования является анализ чувствительности созданной модели для выявления параметров элементов маршрута, оказывающих наибольшее влияние на пропускную способность, и управления ими с целью повышения общей эффективности системы.

Ключевые слова: нейронные сети, ремоделирование, оценка пропускной способности, улично-дорожная сеть, математическое моделирование.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00291, <https://rscf.ru/project/24-21-00291/>.

Для цитирования: Сысоев А.С., Погодаев А.К., Клявин В.Э., Жихорева С.В., Боровкова Г.С. Нейросетевое моделирование пропускной способности улично-дорожной сети. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(4). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1706> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.010

Neural network modeling of street and road network capacity

A.S. Sysoev[✉], A.K. Pogodaev, V.E. Klyavin, S.V. Zhikhoreva, G.S. Borovkova

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation

Abstract. The problems of increasing the number of personal transportation vehicles in urban agglomeration as well as the number of cargos lead to applying Intelligent transportation systems based on Machine Learning techniques and Artificial Intelligence models to create strategies to reduce congestion and to prevent accidents. An important parameter of transportation system showing the effectiveness of using existing urban infrastructure is the capacity of the planned route. The paper is devoted to the creating model of urban route capacity based on the capacities of its elements, they are namely stretches and intersections. The approach to create such model is Mathematical Remodeling, where feed-forward neural network is chosen as a unified class to substitute models of different heterogeneous classes during modeling. It is proposed to use index of route capacity to form data sets for model fitting. The given numerical examples show how the proposed approach can be applied. The

capacities of three planned routes are estimated and the best route is chosen, the efficiency criterion is traffic flow volume to capacity ratio. The prospective issue of the presented study is analyzing sensitivity of the created model to identify the parameters of route elements affecting the most to the capacity and to control them increasing the total efficiency of the system.

Keywords: neural networks, remodeling, capacity estimation, street and road network, mathematical modeling.

Acknowledgements: The study is supported by Russian Science Foundation, project 24-21-00291, <https://rscf.ru/project/24-21-00291/>.

For citation: Sysoev A.S., Pogodaev A.K., Klyavin V.E., Zhikhoreva S.V., Borovkova G.S. Neural network modeling of street and road network capacity. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1706> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.010 (In Russ.).

Введение

В настоящее время многие города и агломерации сталкиваются с проблемой растущего трафика, вызванного высокой мобильностью населения и увеличением числа грузоперевозок. Способом решения таких проблем является применение интеллектуальных транспортных систем (ИТС), основанных на подходах машинного обучения и моделях искусственного интеллекта. Как правило, ИТС предназначены для решения следующих задач: управление дорожным движением, предотвращение аварий, внедрение парковочных систем, контроль загрязнения окружающей среды и т. д. [1]. Организации активно разрабатывают и реализуют проекты по прогнозированию интенсивности движения и управлению потоками. Такие фирмы активно работают в Японии, Америке, Евросоюзе, Австралии, Бразилии, Китае, Канаде, Чили, Корее, Малайзии, Новой Зеландии, Сингапуре, Тайване, Великобритании. В Индии, Таиланде и некоторых странах Южной Африки подобные научные школы и организации только начинают разрабатывать концепцию умных дорог.

На сегодняшний день самые передовые технологии в области ИТС разработаны в Японии, США, Сингапуре и Южной Корее. Основными направлениями развития ИТС в этих странах являются технологии подключенных транспортных средств, подключенные коридоры, управляемые и устойчивые транспортные потоки, «умные дороги», а также интеграция этих технологий в системы «умного города» и Интернета вещей.

Одним из важнейших вопросов, возникающих при планировании ИТС, является оценка пропускной способности существующей инфраструктуры. Положительный запас пропускной способности может обеспечить более высокий уровень функционирования ИТС. Данное исследование посвящено построению модели пропускной способности улично-дорожной сети городской агломерации на основе оценки пропускной способности ее сегментов, а именно перегонов и перекрестков. Каждый сегмент имеет свои характеристики, рассматриваются основные из них (для перегонов – интенсивности движения транспортных потоков, для регулируемых перекрестков – отношения длительностей разрешающих сигналов к длительностям циклов). Подход, заложенный в основу моделирования, представляет собой процедуру математического ремоделирования с использованием нейронной сети в качестве модели унифицированного класса.

Попадая в городскую транспортную систему, транспортные средства сталкиваются со множеством возможностей для проезда через город. В исследовании предлагается создавать маршруты на основе точек отправления и назначения и

оценивать эффективность предложенных маршрутов для выбора рационального. Для достижения этой цели предлагаются следующие этапы (Рисунок 1):

- 1) построить возможные маршруты, используя существующую схему улично-дорожной сети и с учетом организационных ограничений;
- 2) оценить пропускную способность участков с помощью построенной на основе наборов ретроспективных данных нейронной сети (на основе подхода математического ремоделирования);
- 3) использовать существующие настройки объектов светофорной сигнализации и прогнозируемую интенсивность потока для оценки пропускной способности перекрестков в пределах построенных маршрутов (с моделированием перекрестков как систем массового обслуживания типа D/D/1);
- 4) построить индекс пропускной способности маршрутов;
- 5) построить нейросетевую модель, аппроксимирующую индекс пропускной способности маршрута, включая факторы, влияющие на пропускную способность на локальных уровнях (на основе подхода математического ремоделирования);
- 6) выбрать маршрут с минимальным индексом пропускной способности.

В разделах статьи приведены основные направления оценки пропускной способности, особое внимание уделено пропускной способности перегонов и пропускной способности городских перекрестков; описан подход математического ремоделирования; приведены численные примеры, а также сформулированы выводы и намечены перспективные направления исследования.

Современное состояние в области оценки пропускной способности транспортных систем

В каждой стране существуют свои рекомендации по оценке пропускной способности городских улично-дорожных сетей. В зависимости от назначения элементы такой сети можно разделить на два основных типа: перегоны и перекрестки. Следует отметить, что в данном исследовании не рассматриваются кольцевые развязки.

Оценка пропускной способности перегонов улично-дорожной сети. Наиболее известным руководством по оценке пропускной способности дорог является американское Highway Capacity Manual (HCM), новейшее 7-е издание которого опубликовано в 2022 году [2]. Согласно этому документу, на пропускную способность могут влиять следующие факторы: ширина полосы движения, тип дорожного покрытия, скорость свободного потока, плотность точек доступа, боковой клиренс. В случае особого типа улицы или ее нестандартного расположения могут учитываться и другие дополнительные факторы. Например, в российском руководстве ОДМ¹ по оценке пропускной способности указано 17 факторов, среди которых тип обочины, тип дорожной разметки, влияние пешеходов и другие. Стоит отметить, что в подходах HCM, и в российском руководстве эти факторы должны использоваться как понижающие коэффициенты к стандартным значениям пропускной способности, приведенным в их приложениях.

Исследования [3–4] показывают, что наиболее значимыми факторами, влияющими на пропускную способность, являются ширина полосы движения, расположение дороги, процент тяжелых транспортных средств, скорость транспортного потока.

¹ Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.020-2012 «Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог». Москва: Федеральное дорожное агентство (РОСАВТОДОР); 2012. 148 с.

Можно оценить пропускную способность на перегонах, используя подход, приведенный в [5], а затем добавить факторы, влияющие на поведение водителей, в совместную модель пропускной способности для выбранного маршрута.

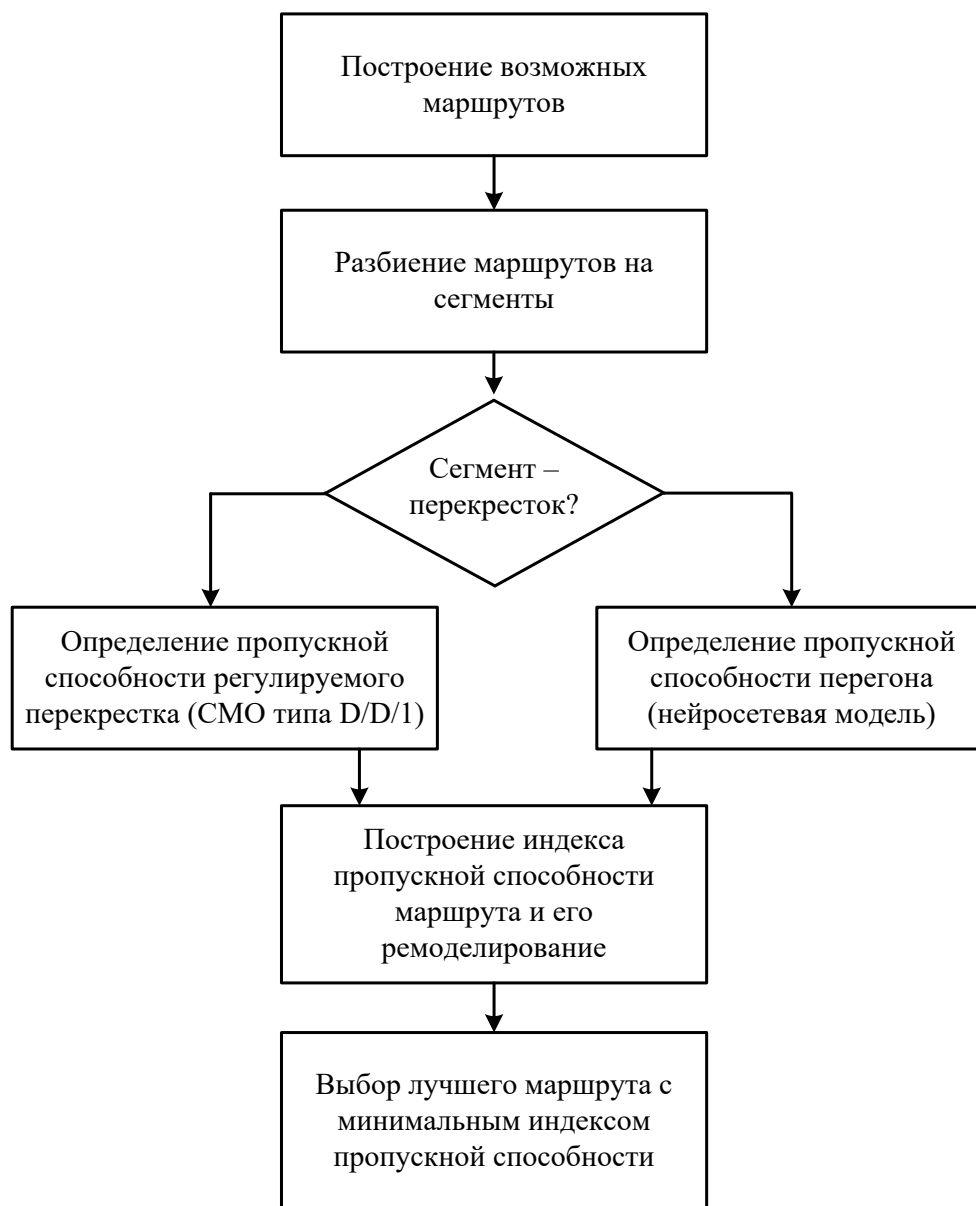


Рисунок 1 – Схема моделирования пропускной способности улично-дорожной сети и выбора лучшего маршрута

Figure 1 – Scheme for modeling the capacity of the street and road network and selecting the best route

В исследовании [6] описывается подход к моделированию пропускной способности участка автомагистрали. Являясь стохастическим параметром транспортного потока [7], пропускная способность моделировалась как случайная величина, описываемая распределением Вейбулла.

При таком подходе участок дороги рассматривается как система массового обслуживания типа D/D/1, где все доступные данные о пропускной способности делятся на два класса временных интервалов: «нецензурированные», когда наблюдаемое значение транспортного потока вызывает затор в следующем временном интервале, и

«цензурированные», когда нет никакой информации о заторе в следующем интервале (свободное движение). Интервалы первого типа могут дать информацию об «измеренной» пропускной способности, которая используется для построения функции распределения для оценки пропускной способности в интервалах второго типа с применением метода Каплана-Мейера. Используя данный подход и эмпирически сравнивая различные типы статистических распределений, на основе данных, полученных на многих участках дорог, было показано, что распределение Вейбулла наилучшим образом соответствует исследуемому параметру. Таким образом, для оценки пропускной способности на участке функция распределения может быть записана в виде

$$F_c(q) = 1 - \exp\left(1 - \left(\frac{q}{b}\right)^a\right),$$

где $F_c(q)$ – функция распределения интенсивности движения, q – интенсивность движения автомобилей (авт./ч), a , b – параметры распределения Вейбулла, отвечающие за вариацию интенсивности движения и систематическое среднее значение интенсивности движения, обусловленное такими постоянными факторами, как количество полос, уклон, количество водителей, соответственно.

В исследовании [8] показано, что такой подход был успешно применен для прогнозирования пропускной способности городских автомагистралей с планировкой рабочих зон.

Подходы к оценке пропускной способности перекрестков. Согласно большинству исследований, основным фактором, влияющим на пропускную способность на подходе к перекрестку, является отношение разрешающего времени движения к длительности цикла. В исследовании [9] приводится подход к оценке пропускной способности перекрестков с регулируемым движением. Предложенная модель предоставляет полезный инструмент для оценки пропускной способности и задержки на регулируемых перекрестках в условиях свободного движения трафика. Используя эту модель, можно непосредственно оценить пропускную способность и, следовательно, качество обслуживания движения на существующих перекрестках, используя данные с детекторов на стоп-линиях. В данном исследовании подчеркивается, что не существует способа измерить пропускную способность регулируемого перекрестка напрямую, но этот параметр можно оценить с помощью модели системы массового обслуживания. В ходе исследования были определены параметры предложенной модели, которые будут использоваться при моделировании. Для численной оценки пропускной способности за цикл используется инструмент моделирования VISSIM.

Оценка пропускной способности маршрута. Пропускная способность маршрута зависит от пропускной способности его элементов. Очевидно, что пропускная способность может быть оценена как пропускная способность наиболее загруженного элемента, однако мы предлагаем индекс, учитывающий параметры всех перегонов и перекрестков, следующим образом:

$$C_{route} = \sum_{i=1}^n \alpha_i c_i,$$

где C_{route} – расчетная пропускная способность выбранного маршрута (авт./ч), c_i – пропускная способность элемента маршрута (авт./ч), α_i – вес элемента i .

Экологической оценке при формировании маршрутов движения транспортных потоков практически не уделяется необходимого внимания. А важность такой оценки диктуется продолжающим увеличением количества подвижного состава

автомобильного транспорта, который по некоторым оценкам обеспечивает до 80–90 % загрязнения атмосферного воздуха крупных городов (в Москве в 2011 г. было 92 %) [10]. В средних городах на примере сопоставимых по численности населения городов Липецк [11] и Магнитогорск [12] доля автомобильного транспорта в загрязняющем воздействии на атмосферный воздух составляет немного более 30 %.

Расчет выбросов загрязняющих веществ для сравнения двух и более формируемых маршрутов для магистрального транспортного потока в городских агломерациях при необходимости создания транспортных коридоров позволяет осуществить выбор маршрута не только по общепринятым критериям, но и дать экологическую оценку, что является особенно важным при наличии близких по остальным параметрам маршрутов. Выполняется расчет количества выбросов загрязняющих веществ по ГОСТ Р 56162-2019² при наличии таких данных по формируемому маршруту, как интенсивность и состав транспортного потока, средней скорости движения, длин перегонов, режима работы светофорных объектов, полученных посредством имитационного моделирования.

Для сравнения формируемых маршрутов требуется привести выбросы к удельным показателям на одну полосу, так как необходимо учитывать, что перегоны могут отличаться по числу полос, а пересечения – по числу входов:

$$M_{\text{взв}}^{\text{ФМ}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{п-н}}} \frac{M_j^{\text{п-н}}}{n^{\text{п-н}}} + \sum_{j=1}^{n_{\text{рп}}} \left(\frac{M_{\text{рп}j}^3 + M_{\text{рп}j}^{\text{P}}}{n^{\text{рп}}} \right),$$

где $M_{\text{взв}}^{\text{ФМ}}$ – удельная величина выбросов загрязняющих веществ на одну полосу формируемого маршрута; $M_j^{\text{п-н}}$ – суммарные выбросы загрязняющих веществ на j -том перегоне; $n_{\text{п-н}}$ – число перегонов; $M_j^{\text{рп}}$ – суммарные выбросы загрязняющих веществ на j -том регулируемом пересечении; $n_{\text{рп}}$ – число регулируемых пересечений.

С учетом высокого уровня автомобилизации не менее важно оценивать уровень обеспечения безопасности дорожного движения (БДД) на формируемых маршрутах. Ведь любое дорожно-транспортное происшествие (ДТП), будь оно с материальным ущербом и тем более с пострадавшими, приводит к задержкам движения транспортных потоков, причем зачастую к существенным. По последним данным [13] за 6 месяцев текущего года на улично-дорожной сети и дорогах населенных пунктов регистрируется 78,8 % всех ДТП.

Для оценки уровня обеспечения БДД используются статический [14] и динамический анализ [15]. Объектом исследования статического анализа являются элементы обустройства перегонов формируемого маршрута, оказывающих влияние на риск возникновения ДТП. Динамический анализ оценки уровня безопасности дорожного движения основан на поведении водителей, характеризуемого нарушениями правил дорожного движения, предшествующих возникновению ДТП, и возможен только при наличии соответствующих данных, обладателем которых является Государственная автомобильная инспекция. В основе методов – нечеткие множества и экспертные оценки. В качестве результирующего параметра используется расстояние Хемминга, оценивающее уровень риска для каждого маршрута.

² ГОСТ Р 56162-2019 «Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории». Москва: Стандартинформ; 2019. 11 с.

Полученные в результате расчетов величины, характеризующие экологический уровень и уровень обеспечения БДД необходимо нормировать, чтобы их сумма равнялась 1:

$$w_{ni} = \frac{w_{ni}}{w_{1i} + w_{2i} + \dots + w_{Ni}},$$

где w_{ni} – нормированное значение количественного показателя i для маршрута n ; w_{ni} – расчетная величина i -го показателя для маршрута n ; N – число выбранных для сравнения маршрутов.

Обобщение полученных показателей по каждому маршруту осуществляется путем агрегирования оценок с учетом значимости соответствующих критериев.

Концепция математического ремоделирования

Следует отметить, что использование множества разнородных факторов приводит к высокой трудоемкости оценки пропускной способности участка улично-дорожной сети. Применение разнородных моделей, зачастую использующих одинаковые входы, может приводить к «зашумлению» реальных показателей при их оценке. Качественная модель должна использоваться в условиях реального времени для оценки пропускной способности улично-дорожной сети города. Поэтому такая модель должна иметь унифицированную структуру, обеспечивающую приемлемую точность. Для этого используется подход ремоделирования.

Ремоделирование заключается в построении новой модели на основе уже существующих [16]. Особенность этого подхода заключается в том, что существующие модели могут структурно принадлежать к разным классам (иногда такие модели могут быть слабо формализованными), в то время как ремоделируемые структуры являются элементами одного класса. Причинами, приводящими к процедуре ремоделирования, могут быть: 1) упрощение модели для простоты ее последующего анализа и управления; 2) упрощение расчета модели при ее численном решении; 3) унификация различных видов моделей (приведение к моделям одного класса) для использования единых известных алгоритмов.

Технически ремоделирование – это алгоритм, позволяющий преобразовать исходную модель в модель предпочтительного класса. Указанная задача не является тривиальной и не может быть решена для всех возможных классов моделей. Даже при принципиальной возможности построения такого алгоритма, точность и временные затраты являются вопросами, которые необходимо изучить перед применением предложенной концепции.

Схожими с ремоделированием являются суррогатное моделирование [17], метамоделирование [18]. Подход ремоделирования уже применялся в металлургическом производстве для построения сквозной модели сталеплавильного процесса [19] и при создании модели для оценки пропускной способности участка автострады [20].

В данном исследовании в качестве моделей унифицированного класса используются классические нейронные сети. Общая форма такой модели имеет вид

$$y = \varphi^{(k)}(w_0^{(k)} + W_1^{(k)} \varphi^{(k-1)} \times \dots \times \left(\dots \left(w_0^{(2)} + W_1^{(2)} \varphi^{(1)} \left(w_0^{(1)} + W_1^{(1)} x \right) \right) \dots \right),$$

где $y \in R$ – выходной скаляр (в данном исследовании показатель пропускной способности на перегоне или линии пересечения), $x \in R^n$ – входной вектор, $\varphi^{(i)}$, $i =$

$1, \dots, k$ – векторные функции векторных аргументов, функции активации, $W_1^{(i)}$ – матрицы весовых коэффициентов от слоя $(i - 1)$ к i , $w_0^{(i)}$, $i = 1, \dots, k$ – веса смещения.

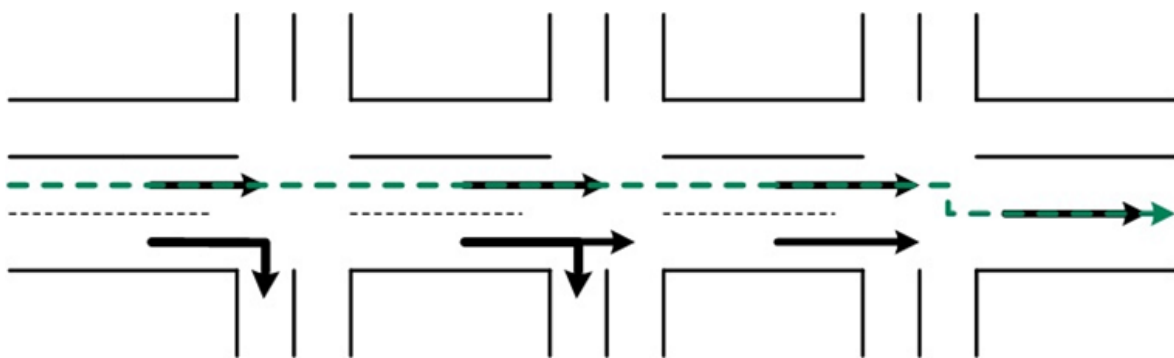
Численные эксперименты

Схема проведения эксперимента. В городе Липецке были выбраны две точки и три маршрута, соединяющие эти точки (схемы маршрутов представлены на Рисунке 2).

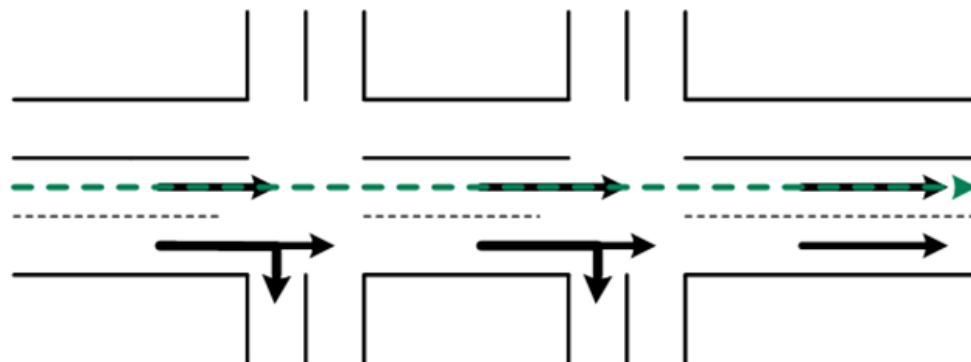
Маршрут 1 (Рисунок 2 а) включает 4 перегона и 3 регулируемых перекрестка, на 1-м перекрестке имеется только одна полоса для прямого движения; 4-й перегон состоит из 1 полосы; маршрут 2 (Рисунок 2 б) включает 3 перегона и 2 перекрестка; маршрут 3 (Рисунок 2 в) состоит из 4 перегонов и 3 перекрестков на 3-м перегоне имеется одна полоса для прямого движения.

Пропускная способность всех перегонов и перекрестков оценивалась в различных условиях (интенсивность движения варьировалась от 350 до 1000 в час на полосу; использовалось фиксированное время длительности цикла для каждого перекрестка, равное 120 с; длительность разрешающих движение фаз составляла от 10 до 60 с). Единственными параметрами транспортной системы, которыми можно управлять в условиях города, являются время разрешающего движения сигнала для выбранного направления на перекрестках, а также время цикла и количество полос на перегонах (применение реверсивных полос могло бы обеспечить такую схему движения автомобилей). Именно поэтому указанные параметры были включены в нейросетевые модели, дающие прогнозируемую пропускную способность для маршрутов 1, 2 и 3. Прежде были получены оценки пропускной способности участков (с применением стохастического подхода), а также пропускной способности перекрестков, обеспечивающих движение транспортных средств по маршруту.

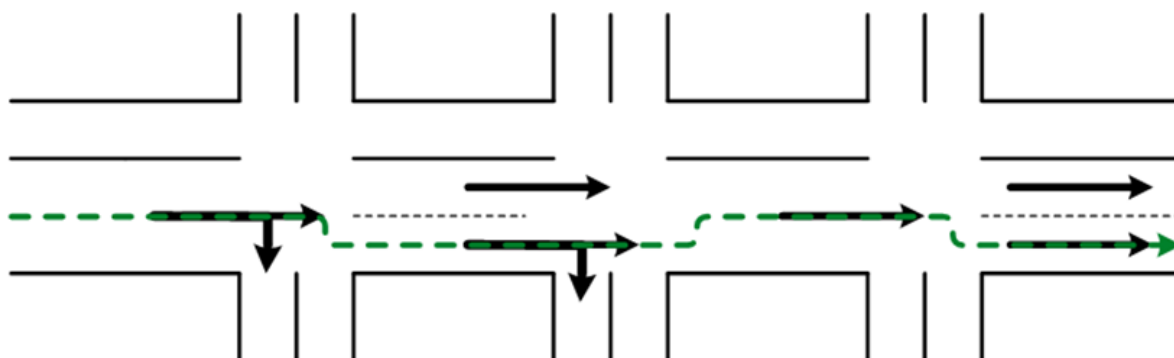
Затем были рассчитаны оценки пропускной способности маршрута. Были построены наборы данных, состоящие из длительностей разрешающего сигнала на перекрестках, количества полос на перегонах и расчетной пропускной способности для трех маршрутов, затем они были разделены на наборы данных для обучения и тестирования в соотношении 80 % и 20 % соответственно, общее количество реализаций в каждом наборе данных для обучения составляет 8000 случаев.



(а) – конфигурация маршрута 1



(б) – конфигурация маршрута 2



(в) – конфигурация маршрута 3

Рисунок 2 – Конфигурации построенных маршрутов
Figure 2 – Configurations of constructed routes

На основе созданных наборов данных были идентифицированы нейросетевые модели для трех описанных выше маршрутов:

Модель I: 7 входов (интенсивности потока на перегонах маршрута, отношения длительностей разрешающих фаз к длительностям циклов), 5 нейронов на скрытом слое;

Модель II: 5 входов (интенсивности потока на перегонах маршрута, отношения длительностей разрешающих фаз к длительностям циклов), 3 нейрона на скрытом слое;

Модель III: 7 входов (интенсивности потока на перегонах маршрута, отношения длительностей разрешающих фаз к длительностям циклов), 3 нейрона на скрытом слое, использовались сигмоидальные функции активации во всех трех моделях для каждого нейрона:

$$\varphi(net) = \frac{1}{1 + \exp(-net)}$$

Обсуждение полученных результатов. На Рисунке 3 в качестве примера показаны диаграммы размахов для интенсивности транспортного потока на перегонах маршрута 1, а на Рисунке 4 приведено распределение интенсивности потока на перекрестках в пределах маршрута 1. Видно, что медиана интенсивности потока на всех перегонах постоянна, а интенсивность потока на перегоне 3 выше, что может быть объяснено геометрией маршрута. Следует отметить, что при построении моделей скорости в расчет не принимались.

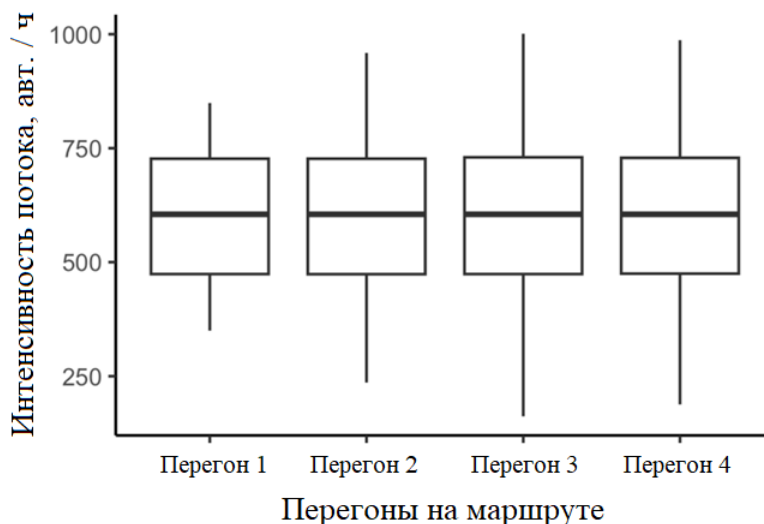


Рисунок 3 – Распределение интенсивностей на перегонах маршрута 1
Figure 3 – The distribution of flow rates on stretches of the route 1

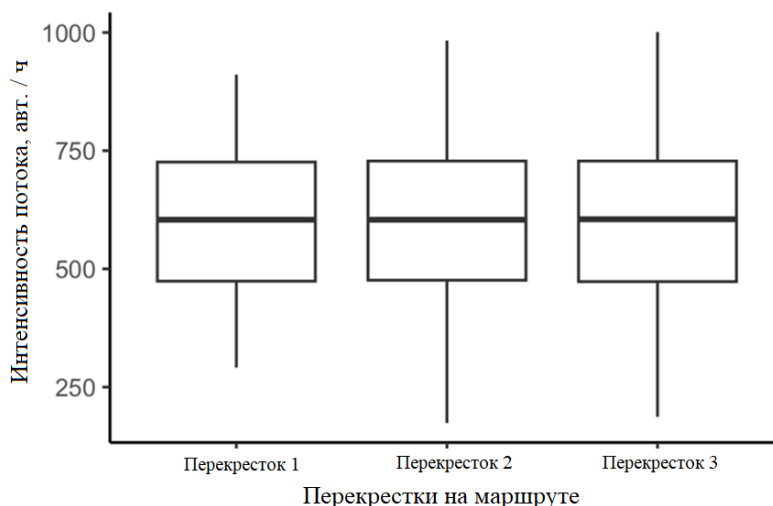


Рисунок 4 – Распределение интенсивностей на перекрестках маршрута 1
Figure 4 – The distribution of flow rates on intersections of the route 1

В Таблице 1 приведена информация о качестве созданной модели. Были выбраны следующие метрики: средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE).

Таблица 1 – Метрики качества построенных моделей
Table 1 – Quality metrics of the created models

	Модель I	Модель II	Модель III
MAE, авт./ч	13,26	35,49	34,38
MAPE, %	2,36	4,61	4,45
RMSE, авт./ч	15,27	46,34	43,16

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что созданные модели имеют приемлемое качество и могут быть использованы для оценки пропускной способности маршрута.

На Рисунке 5 представлена гистограмма распределения прогнозируемой пропускной способности на маршруте 1 в сравнении с расчетной пропускной способностью для тестового набора данных.

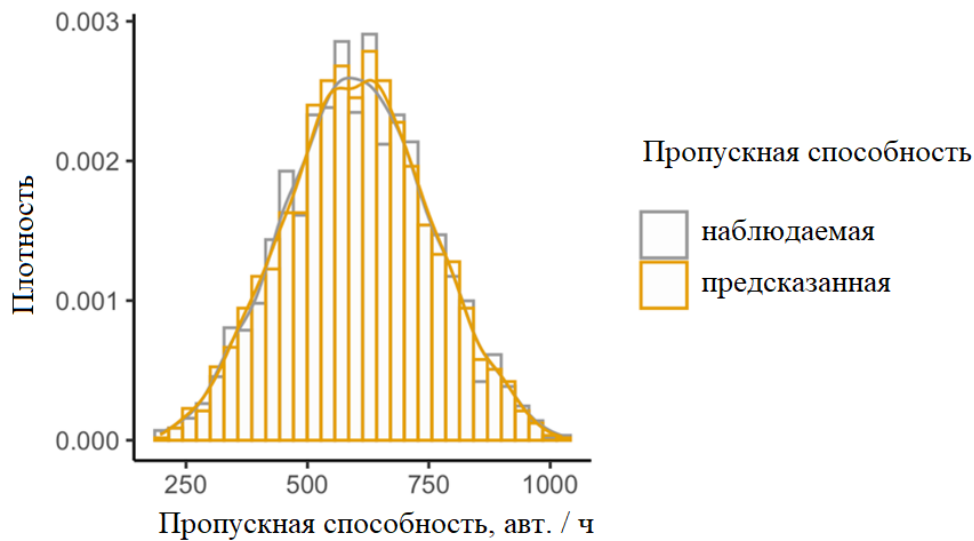


Рисунок 5 – Сравнение прогнозируемой пропускной способности (желтые столбцы) с расчетными показателями (серые столбцы) для маршрута 1
 Figure 5 – Comparing predicted capacity (yellow columns) with the estimated measures (grey columns) for the route 1

Проведенный эксперимент с этими маршрутами показал, что в данных условиях маршрут 1 имеет меньшую пропускную способность по сравнению с двумя другими маршрутами, что означает, что этот маршрут может быть выбран для движения транспорта в случае сравнимых показателей экологической и дорожной безопасности.

Заключение и перспективы исследования

В исследовании предлагается оценить пропускную способность выбранных маршрутов в рамках городской дорожно-уличной сети. Для этого был использован подход математического ремоделирования, дающий возможность использовать разные типы моделей для оценки различных параметров системы, а затем, объединив полученные результаты, построить единую модель. Для оценки пропускной способности на перегонах был выбран стохастический подход, а для определения пропускной способности на перекрестках – метод прямых измерений и моделирования. В качестве единого класса ремоделирующих моделей была выбрана нейросетевая структура и построены модели для трех перспективных маршрутов. В качестве входных данных в модель были включены такие переменные параметры системы, как количество полос на перегонах и длительность разрешающего сигнала светофора. Полученные метрики качества позволяют сделать вывод о том, что данные модели могут быть использованы для оценки пропускной способности маршрутов в рамках городской улично-дорожной сети.

Перспективная задача заключается в определении наиболее значимых входных факторов модели в рамках выбранного маршрута. Решение будет основано на применении анализа чувствительности [20], построенного с применением анализа конечных изменений, и поможет создать систему управления транспортными потоками [21] в городской дорожной сети. Отличие предлагаемого подхода от существующих заключается в нахождении точных оценок мер чувствительности, построенных с

использованием весовых коэффициентов модели и значений ее входов (не используя при этом аппроксимацию).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Schrab K., Neubauer M., Protzmann R., Radusch I., Manganiaris S., Lytrivis P. Modeling an ITS Management Solution for Mixed Highway Traffic With Eclipse MOSAIC. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023;24(6):6575–6585. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3204174>
2. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. Washington, DC: The National Academies Press; 2022. 1286 p. <https://doi.org/10.17226/26432>
3. Abdel-Aal M.M.M., El-Maaty A.E.A., Abo Samra H.A. Factors Affecting Road Capacity Under non-Ideal Conditions in Egypt. *Nova Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;7(1):1–13.
4. Feng X., Zhang Y., Qian S., Sun L. The Traffic Capacity Variation of Urban Road Network due to the Policy of Unblocking Community. *Complexity*. 2021;2021(1). <https://doi.org/10.1155/2021/9292389>
5. Geistefeldt J., Brilon W. A Comparative Assessment of Stochastic Capacity Estimation Methods. In: *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*. Boston, MA: Springer; 2009. pp. 583–602. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0820-9_29
6. Sysoev A., Anikienko T., Blyumin S. Highway Capacity Estimation: International Regulation and Neurostructural Remodeling Approach. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2020;48(2):180–188. <https://doi.org/10.3311/PPtr.12880>
7. Brilon W., Geistefeldt J., Zurlinden H. Implementing the concept of reliability for highway capacity analysis. *Transportation Research Record*. 2007;(2027):1–8. <https://doi.org/10.3141/2027-01>
8. Sysoev A., Voronin N. Approach to Sensitivity Analysis of Stochastic Freeway Capacity Model Based on Applying Analysis of Finite Fluctuations. In: *Proceedings – 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, 20–22 November 2019, Lipetsk, Russia*. IEEE; 2019. pp. 621–626. <https://doi.org/10.1109/SUMMA48161.2019.8947493>
9. Wu N., Giuliani S. Capacity and Delay Estimation at Signalized Intersections Under Unsaturated Flow Condition Based on Cycle Overflow Probability. *Transportation Research Procedia*. 2016;15:63–74. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.006>
10. Ковригин А.А., Маршалкович А.С. Оценка воздействия от выбросов движущегося автотранспорта для обеспечения экологической безопасности жизнедеятельности горожан. *Строительство: наука и образование*. 2016;(3). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_27184770_47207620.pdf
Kovrigin A.A., Marshalkovich A.S. Assessment of Emissions from Moving Vehicles for Environmental Safety of Townspeople. *Construction: Science and Education*. 2016;(3). (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_27184770_47207620.pdf
11. Седых В.А., Беляева Л.Н., Климов Д.С. Состояние атмосферного воздуха города Липецк. *Проблемы региональной экологии*. 2019;(3):77–80. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-13077>
Sedykh V.A., Belyaeva L.N., Klimov D.S. The condition of the atmospheric air in the city of Lipetsk. *Problemy regional'noi ekologii*. 2019;(3):77–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-13077>
12. Пыгалева О.А., Фридрихсон О.В., Бердашкевич С.М. Исследование экологического аспекта при организации транспортных потоков в городах (на

- примере города Магнитогорска). *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2016;6(1):58–64. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2016-6-1-58-64>
- Pytaleva O.A., Fridrikhson O.V., Berdashkevich S.M. The study on environmental aspects in the organization of urban traffic flows (on the example of Magnitogorsk city). *Modern Problems of Russian Transport Complex*. 2016;6(1):58–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2016-6-1-58-64>
13. Баканов К.С. и др. *Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 6 месяцев 2024 года: информационно-аналитический обзор*. Москва: ФКУ «НЦ БДД МВД России»; 2024. 37 с.
 14. Корчагин В.А., Погодаев А.К., Клявин В.Э., Суворов В.А. Метод объективной оценки уровня обеспечения безопасности движения. *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2017;(1):10–12.
Korchagin V.A., Pogodaev A.K., Klyavin V.E., Suvorov V.A. Objective method for assesment of road safety level. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2017;(1):10–12. (In Russ.).
 15. Корчагин В.А., Погодаев А.К., Клявин В.Э., Суворов В.А. Метод комплексной оценки уровня безопасности дорожного движения на дорожной сети. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2016;(2):88–94.
Korchagin V.A., Pogodaev A.K., Klyavin V.E., Suvorov V.A. Comprehensive assessment method level road safety on the road network. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2016;(2):88–94. (In Russ.).
 16. Saraev P.V., Blyumin S.L., Galkin A.V., Sysoev A.S. Neural Remodelling of Objects with Variable Structures. In: *Proceedings of the Second International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'17): Volume 1, 14–16 September 2017, Varna, Bulgaria*. Cham: Springer; 2018. pp.141–149. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68321-8_15
 17. Hou C.K.J., Behdinan K. Dimensionality Reduction in Surrogate Modeling: A Review of Combined Methods. *Data Science and Engineering*. 2022;7(4):402–427 <https://doi.org/10.1007/s41019-022-00193-5>
 18. Stavropoulos P., Papacharalampopoulos A., Sabatakakis K., Mourtzis D. Metamodelling of Manufacturing Processes and Automation Workflows towards Designing and Operating Digital Twins. *Applied Sciences*. 2023;13(3). <https://doi.org/10.3390/app13031945>
 19. Saraev P.V. Mathematical Remodeling of Technological Processes Using Factor Space Partitioning. In: *2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon, 09–16 September 2018, Sochi, Russia*. IEEE; 2018. pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501713>
 20. Sysoev A. Sensitivity Analysis of Mathematical Models. *Computation*. 2023;11(8). <https://doi.org/10.3390/computation11080159>
 21. Sysoev A., Galkin A., Khabibullina E. Hybrid Model of Controlling Traffic Flows Within Regional Intelligent Transportation System. In: *Reliability and Statistics in Transportation and Communication: Selected Papers from the 20th International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat2020, 14–17 October 2020, Riga, Latvia*. Cham: Springer; 2021. pp. 528–537. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68476-1_49

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сысоев Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация.

e-mail: sysoev_as@stu.lipetsk.ru

ORCID: [0000-0002-0866-1124](https://orcid.org/0000-0002-0866-1124)

Anton S. Sysoev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation.

Погодаев Анатолий Кирьянович, доктор технических наук, профессор, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация.

e-mail: pak@stu.lipetsk.ru

Anatoly K. Pogodaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation.

Клявин Владимир Эрнстович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник научно-исследовательского института, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация.

e-mail: vllk@list.ru

ORCID: [0000-0002-7839-4463](https://orcid.org/0000-0002-7839-4463)

Vladimir E. Klyavin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher at the Research Institute, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation.

Жихорева Светлана Викторовна, ассистент, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация.

e-mail: zhikhoreva_sv@stu.lipetsk.ru

ORCID: [0000-0001-6904-8035](https://orcid.org/0000-0001-6904-8035)

Svetlana V. Zhikhoreva, Assistant, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation.

Боровкова Галина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация.

e-mail: haligh@mail.ru

ORCID: [0009-0004-9851-6634](https://orcid.org/0009-0004-9851-6634)

Galina S. Borovkova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 06.10.2024; одобрена после рецензирования 20.10.2024; принята к публикации 28.10.2024.

The article was submitted 06.10.2024; approved after reviewing 20.10.2024; accepted for publication 28.10.2024.