

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕЖНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИЦИИ СЕТЕЙ ПЕТРИ С ВРЕМЕННЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ АКТИВАЦИИ ПЕРЕХОДОВ

MODELLING OF ADJACENT CONTROLLED INTERSECTIONS USING A COMPOSITE PETRI NET WITH TEMPORAL CONSTRAINTS ON TRANSITION ACTIVATION

I. Kovatsenko
V. Pechenkin

Summary. Modelling traffic flows is a challenging task due to the high dynamism and stochasticity of the processes. Existing methods often do not consider the mutual influence of events, which reduces the accuracy of forecasting. The aim of the paper is to propose a method for modelling traffic flows based on the composition of Petri nets with constraints on the time of triggering transitions, which allows to analyze complex scenarios, including traffic accidents. The paper presents an approach that uses a composition of Petri nets with constraints on crossing time to describe the interaction between traffic flows and infrastructure. The method includes formalization of traffic rules, consideration of random events and analysis of system states. The application of the proposed approach is demonstrated on the example of road traffic accident modelling. The developed model allows analyzing traffic flows with high detail, including emergency situations. Experimental verification has shown the adequacy of the proposed model and the possibility of obtaining the characteristics of the traffic flow, for further assessment of the impact of accidents on the road situation and prediction of consequences. The proposed method can be used to optimize road infrastructure, develop traffic management systems, and simulate emergency situations. The approach has the potential for integration into intelligent transport systems.

Keywords: road traffic, regulated intersection, Petri net composition, time constraints Petri net, hybrid model.

Коваценок Игорь Николаевич

аспирант, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
igor.kovatsenko@yandex.ru

Печенкин Виталий Владимирович

доктор социологических наук,
кандидат физико-математических наук, профессор,
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
pechenkinvv@sstu.ru

Аннотация. Моделирование транспортных потоков является сложной задачей из-за высокой динамичности и стохастичности процессов. Существующие методы часто не учитывают взаимовлияние событий, что снижает точность прогнозирования. Цель работы — предложить метод моделирования транспортных потоков на основе композиции сетей Петри с ограничениями на период времени срабатывания переходов, позволяющий анализировать сложные сценарии, включая дорожно-транспортные происшествия. В статье представлен подход, использующий композицию сетей Петри с ограничениями на период времени срабатывания переходов для описания взаимодействия транспортных потоков и инфраструктуры. Метод включает формализацию правил движения, учет случайных событий и анализ состояний системы. На примере моделирования ДТП демонстрируется применение предложенного подхода. Разработанная модель позволяет анализировать транспортные потоки с высокой детализацией, включая аварийные ситуации. Экспериментальная проверка показала адекватность предложенной модели и возможность получения характеристик транспортного потока, для последующей оценки влияния ДТП на дорожную обстановку и прогнозирования последствий. Предложенный метод может быть использован для оптимизации дорожной инфраструктуры, разработки систем управления трафиком и моделирования чрезвычайных ситуаций. Подход обладает потенциалом для интеграции в интеллектуальные транспортные системы.

Ключевые слова: дорожный трафик, регулируемый перекресток, композиция сетей Петри, временные ограничения, гибридная модель.

Введение

Моделирование транспортных потоков в условиях городской инфраструктуры представляет собой сложную научно-техническую задачу, требующую учета множества взаимосвязанных факторов. Основная сложность заключается в необходимости точного отражения динамических характеристик транспортных потоков, которые подвержены существенным временным и пространственным вариациям [1].

В условиях стремительной урбанизации последних лет управление городским трафиком сталкивается со значительными сложностями. Важным аспектом является учет временных ограничений при управлении светофорными объектами. Традиционные подходы часто не позволяют адекватно моделировать задержки распространения транспортных потоков между смежными перекрестками, что приводит к существенным погрешностям при прогнозировании характеристик транспортной сети [2]. Особую сложность представляет син-

хронизация работы светофорных объектов в условиях переменной интенсивности движения, когда стандартные временные циклы оказываются неэффективными.

Масштабируемость моделей представляет отдельную методологическую проблему. С увеличением количества моделируемых объектов вычислительная сложность растет нелинейно, что ограничивает возможность анализа крупных транспортных сетей [3]. Особую актуальность приобретает разработка методов агрегации и декомпозиции, позволяющих сохранить адекватность модели при сокращении вычислительных затрат.

Существенное влияние на точность моделирования оказывает стохастическая природа транспортных потоков. Факторы случайного характера — дорожно-транспортные происшествия, погодные условия, сезонные колебания интенсивности — требуют применения вероятностных методов анализа. При этом сохраняется необходимость обеспечения устойчивости системы управления к подобным возмущениям [4].

Решение указанных проблем требует разработки формальных методов, сочетающих аналитические подходы с имитационным моделированием. Данная статья является продолжением работы авторов на тему моделирования транспортных потоков на регулируемых перекрестках с использованием временных сетей Петри [5].

Материалы и методы

В данной работе используется метод композиции временных сетей Петри (СП), учитывающих период времени активации переходов. На Рисунке 1 изображен фрагмент сети Петри из двух мест и перехода между ними. Основные определения используемой модели сети Петри с рядом дополнительных функциональных ограничений представлены в работах авторов [6, 7]. Каждому переходу присвоен интервал активации.

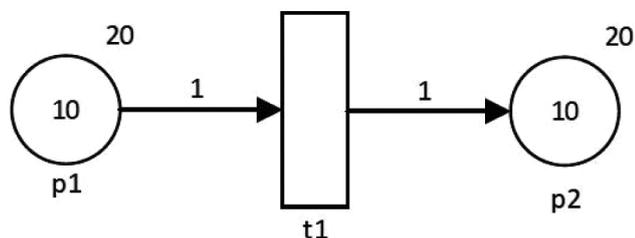


Рис. 1. Отображение сети Петри

В статье рассматривается модель системы из нескольких перекрестков с использованием СП. Система из нескольких сетей Петри, где выходы одной сети являются входами другой, далее именуется как композиция сетей Петри. Данный подход обеспечивает масштабирование модели на систему взаимодействующих перекрестков. Каждый перекресток представлен отдельным

модулем, взаимодействующим с соседними узлами через общие переходы. Этот подход, описанный в работах по адаптивному управлению сигналами с приоритетом общественного транспорта, позволяет гибко перенастраивать фазы светофоров при сохранении глобальной координации [8]. Также методы композиции сетей Петри рассматриваются в работе, в частности композиция, основанная на комбинаторном операторе [9].

При построении модели используются определения характеристик транспортного потока: объем (q), плотность (k), скорость (v), средняя скорость по времени (v_{time}), пространственная средняя скорость (v_{space}), средний интервал следования (h), дистанция (s), занятость полосы движения, а также выражения, полученные с использованием этих параметров [10, 11].

В статье используется следующая классификация моделей по уровню детализации: макроскопические, микроскопические, мезоскопические [12]. В работе [13] гибридная модель микро-мезоскопического уровня позволила использовать преимущества микроскопических моделей для анализа отдельных процессов с учетом характеристик транспортных средств — участников трафика, и одновременно с этим анализировать транспортные потоки в целом там, где не требуется глубокая детализация.

Результаты

Далее в статье будет рассмотрено использование модели с использованием композиции сетей Петри на примере двух смежных регулируемых перекрестков. Для удобства описания перекрестки именуется как «перекресток А» и «перекресток В». На Рисунке 2 изображена схема перекрестка В. Каждый перекресток состоит из четырех секций, сориентированных по сторонам света (Север — Юг — Восток — Запад). Каждая секция представлена подмножеством мест и переходов на сети Петри, на рисунке места и переходы представлены направлениями движения N, S, W, E.

Работа каждого перекрестка разбивается на фазы. Каждая фаза определяет разрешенные направления движений. Цикл фаз перекрестка — это повторение последовательных смен фаз перекрестка. Работа светофоров перекрестка с момента начала фазы I до момента окончания фазы II — это одна итерация цикла. Моделирование циклов фаз перекрестков обеспечивается ограничениями по времени s в сети Петри. На Рисунке 3 представлен цикл фаз перекрестка В. Длительности фаз I, II, III перекрестка А равны 40, 20, 25 секунд, соответственно. Длительности фаз I и II перекрестка В равны 40 и 30 секунд, соответственно.

На рисунке 4 изображен фрагмент композиции сетей Петри перекрестков — сеть для перекрестка В. На схеме



Рис. 2. Схема перекрестков

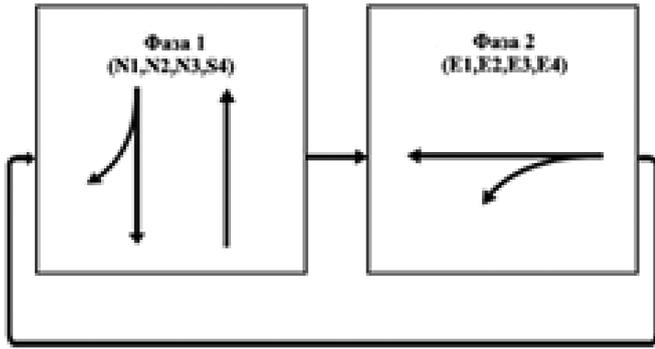


Рис. 3. Фазы перекрестков

выделены 4 области, места и переходы которых отражают соответствующие секции перекрестка В. Верхняя (темно-серая) область — это места и переходы, которые моделируют северную секцию перекрестка. Нижняя (серая), правая (средне-серая) и левая (светло-серая) моделируют, соответственно, южную, восточную и западную секции перекрестка. С частью сети Петри, соответствующей перекрестку А, можно ознакомиться в статье авторов [5]. На рисунке изображена часть сети Петри, моделирующая перекресток «В».

Места и переходы имеют следующие правила именования: префикс А или В обозначает к какому перекрестку относится место или переход; места накопления токенов обозначаются как X, Xout, XoutY, Xin и XbtwnY; переходы обозначаются как XgoOut, XgoY, Xsrc и Xout; где X и Y — это соответствующее направление движения на пере-

крестке (см. схему направлений движения на Рисунке 2). Переходы Xsrc и Xout являются генераторами и выходами сети Петри, для несмежных секций перекрестков. Места XbtwnY обеспечивают возможность моделирования ситуации перестроения транспортных средств между полосами движения.

Обсуждение

Так как начала и длительности итераций циклов фаз двух перекрестков не совпадают, то их необходимо согласовать по времени, для этого в модели описаны ограничения по времени для циклов фаз перекрестков. Последовательность циклов составляет 14 циклов фаз для перекрестка А и 17 циклов фаз для перекрестка В. Длительность последовательности циклов фаз составляет 1190 секунд — это время с момента начала фазы I перекрестка А и середины фазы I перекрестка В до первого повторения последовательности циклов (Рисунок 5). Верхняя строчка — это последовательность циклов фаз перекрестка А, где AI, AII, AIII обозначают фазы I, II и III перекрестка А. Нижняя строчка аналогично изображает последовательность циклов фаз перекрестка В.

В качестве критериев адекватности модели используется подход к верификации модели [5]. Основные критерии адекватности модели представлены выражениями:

$$\forall_{x \in P} k_x \leq cap_x, \tag{1}$$

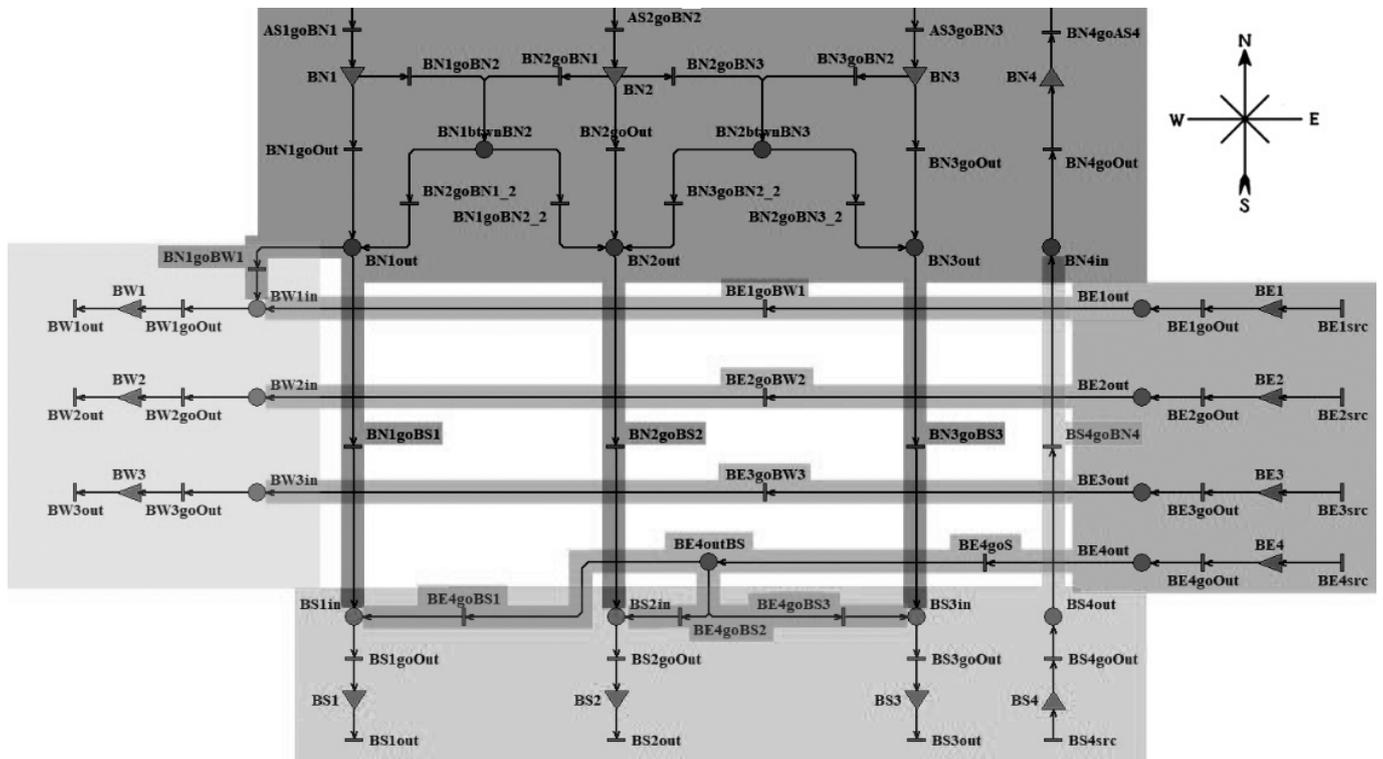


Рис. 4. Часть сети Петри для перекрестка В

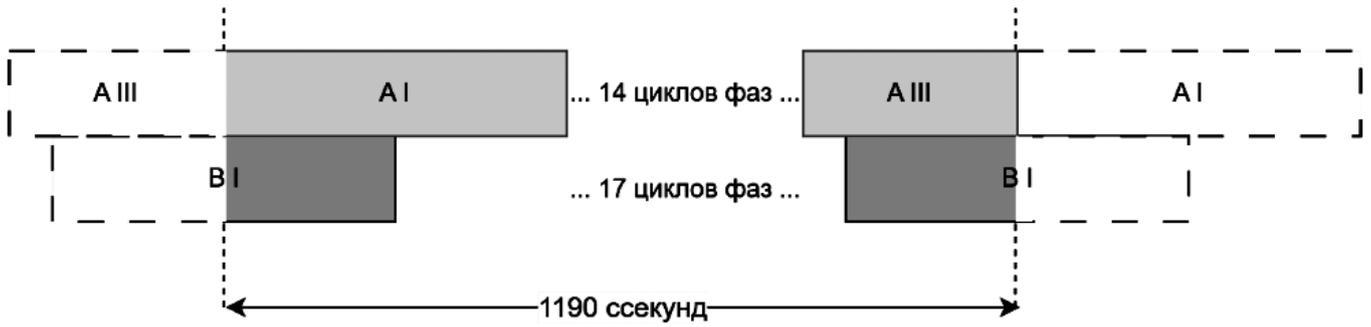


Рис. 5. Схема последовательности циклов фаз

где k_x — плотность транспортного потока на участке, представленная токенами места вершины x ; cap_x — вместимость участка дороги, представленного местом x .

$$\sum \Delta (act_{\text{вых}} - psg_{\text{вых}}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $act_{\text{вых}}$ — число срабатываний переходов на выходах с перекрестка; $psg_{\text{вых}}$ — число реальных проездов транспортных средств на выезде с перекрестка.

$$\frac{act_{\text{общ}}}{\tau_{\text{фаз}}} \leq \varepsilon, \quad (3)$$

где $act_{\text{общ}}$ — общее число переходов симуляции; $\tau_{\text{фаз}}$ — длительность фазы; ε — предел допустимой погрешности.

$$(P_{lst} \subseteq P) \wedge (P_{crs} \subseteq P) \wedge (P_{crs} \cap P_{lst} = \emptyset) \wedge (\forall x \in P_{crs}, k_x = 0), \quad (4)$$

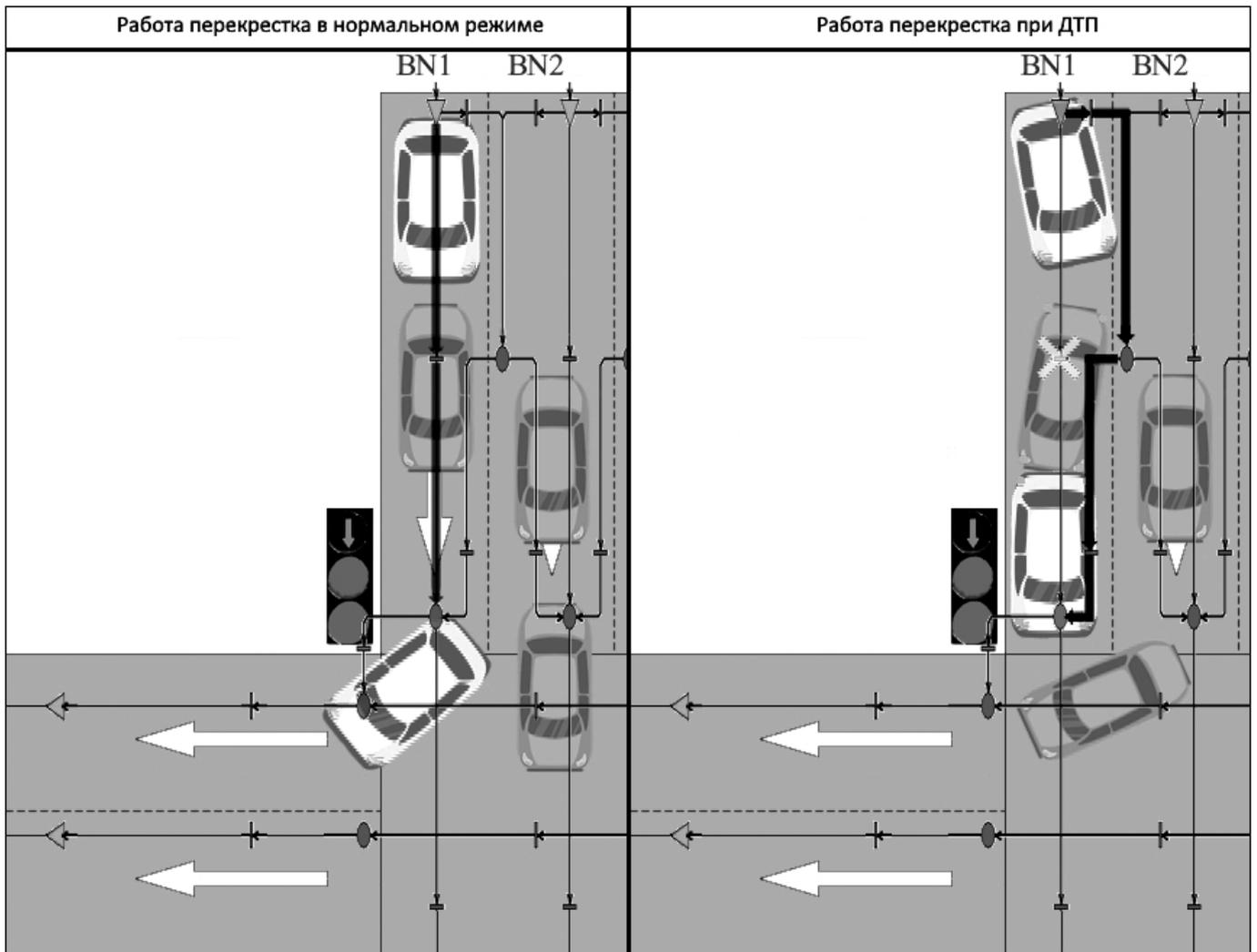


Рис. 6. Схема транспортных потоков в секции ВН при моделировании ДТП

где P — множество мест, задействованных в предыдущей фазе; P_{st} — множество мест, которые могли быть задействованы в предыдущей фазе; P_{crs} — множество мест, которые отражают пересечения путей следования ТС нескольких направлений; k_x — плотность транспортного потока на участке с местом x .

Разработанная модель может быть классифицирована как гибридная микро-мезоскопическая модель, так как она моделирует движение транспортных средств на перекрестке, учитывая характеристики отдельных транспортных средств, относящиеся к микроскопическим моделям, при этом модель позволяет анализировать характеристики транспортных потоков, относящиеся к мезоскопическим моделям, на уровне перекрестков. В предложенной модели наблюдается проблема высокого потребления ресурсов, свойственная микроскопическим моделям. Одним из направлений развития является добавление в модель возможности отключения микроскопического аспекта или его явного включения для конкретных ситуаций, например для имитации дорожного трафика при возможных дорожно-транспортных происшествиях. Такое улучшение необходимо для построения моделей крупных логистических участков города.

Предложенная модель позволяет моделировать дорожно-транспортные события, например столкновение двух транспортных средств в полосе, с препятствием дальнейшего проезда по ней. На Рисунке 6 изображено сравнение транспортных потоков при нормальной работе перекрестка и при наличии дорожно-транспортного происшествия в полосе BN1. Ситуация моделирует ДТП, которое не позволяет транспортным средствам продолжать движение в полосе, вынуждая их выполнять перестроение для объезда препятствия. Моделирование ситуации возможно за счет использования в сети

участков мест и переходов, отражающих возможность перестроения транспортных средств, а также настройкой приоритетов переходов. Для перехода BN1goOut установлено значение приоритета равное нулю. Значения переходов BN1goBN2 и BN2goBN2_2 увеличено в соответствии с нормальным приоритетом перехода BN1goOut. Таким образом токены перемещаются из места BN1 через переход BN1goBN2 в место BN1btwnBN2, затем через переход BN2goBN1_2 в место BN1out, далее токены перемещаются в соответствии с нормальными приоритетами переходов из места BN1out.

Стоит отметить, что модель не учитывает в числе характеристик транспортных средств целевое направление движения отдельных токенов. Например водители, которые планировали двигаться из BN1 в BS1 или в BW1, из-за случайного срабатывания переходов могут быть перемещены из места BN1btwnBN2 в место BN2out через переход BN1goBN2_2 и далее на выход по направлению BS2. Таким образом модель может перенаправить часть токенов на выходы, отличающиеся от целевых. В качестве развития модели может быть добавлена характеристика целевого выхода, как переход для выхода из сети соответствующего токена.

Заключение

В статье предложен метод композиции временных сетей Петри, учитывающих период времени активации переходов, для решения задачи моделирования движения транспортных средств на смежных регулируемых перекрестках с согласованными фазами активации переходов. В статье описаны критерии адекватности для предложенной модели и продемонстрированы результаты применения предложенного метода для моделирования дорожно-транспортного происшествия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dolinina O., Pechenkin V., Gubin N. Combined Intellectual and Petri Net with Priorities Approach to the Waste Disposal in the Smart City. In: Recent Research in Control Engineering and Decision Making: Proceedings of the International Conference on Information Technologies, 07–08 February 2019, Saratov, Russia. Cham: Springer; 2019. P. 755–767. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12072-6_61
2. Jiang J., Han C., Zhao W. X., & Wang J. Propagation Delay-Aware Dynamic Long-Range Transformer for Traffic Flow Prediction. In: Thirty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence, 7–14 February 2023, Washington DC, USA. Washington: AAAI Press; 2023. P. 4365–4373. <https://doi.org/10.1609/aaai.v37i4.25556>
3. Wang J., Boukerche A. The Scalability Analysis of Machine Learning Based Models in Road Traffic Flow Prediction. In: ICC 2020 — 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), 7–11 June 2020, Dublin, Ireland. IEEE; 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/ICC40277.2020.9148964.
4. N'golo Konaté & Kimathi Mark & Danho Emile. Integrating Stochastic Properties into Traffic Flow Modeling: A Stimulus-Response Approach. Journal of Mathematics and Statistics. 2024;20(1):53–62. <https://doi.org/10.3844/jmssp.2024.53.62>
5. Печенкин В.В., Коваценок И.Н. Моделирование трафика на регулируемом перекрестке с использованием сетей Петри с ограничениями на период времени срабатывания переходов. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2025;13(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1841> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.006
6. Печенкин В.В., Коваценок И.Н. Информационное моделирование транспортных процессов с использованием композиции сетей Петри с приоритетами. Искусственный интеллект и цифровые технологии в подготовке специалистов для различных отраслей экономики: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, 21–23 мая 2024 года, Саратов, Россия. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; 2024. С. 118–126.

7. Коваценко И.Н., Печенкин В.В. Использование сетей Петри с приоритетами для моделирования трафика управляемого перекрестка. В сборнике: Современные научные технологии и инновации: вклад в устойчивое развитие и многополярное мироустройство: материалы международной научно-практической конференции, 12–13 апреля 2024 года, Уральск, Казахстан. Уральск: Казахстанский университет инновационных и телекоммуникационных систем; 2024. С. 116–123.
8. Jeng A.A.-K., Jan R.-H., Chen Ch., Chang T.-L. Adaptive Urban Traffic Signal Control System with Bus Priority. 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 2013:1–5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2013.6691860>
9. Amparore E.G., Donatelli S. The Ins and Outs of Petri Net Composition. In: Application and Theory of Petri Nets and Concurrency: 45th International Conference, PETRI NETS 2024, 26–28 June 2024, Geneva, Switzerland. Lecture Notes in Computer Science, vol 13288. Cham: Springer; 2024. P. 278–299. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06653-5_15
10. Bennett D., Erceg J. Guide to Traffic Management Part 2: Traffic Theory Concepts. Sydney: Austroads; 2020. 122 p.
11. Tsuboi T. Traffic Flow Analysis and Management. Design of Cities and Buildings — Sustainability and Resilience in the Built Environment. 2021; <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95087>
12. Недяк А.В., Рудзейт О.Ю., Зайнетдинов А.Р. Классификация методов моделирования транспортных потоков. Вестник Евразийской науки. 2019; 11(6). <https://esj.today/PDF/87SAVN619.pdf>
13. Nedyak A.V., Rudzeyt O.U., Zainetdinov A.R. Classification of methods for modeling traffic flows. The Eurasian Scientific Journal. 2019; 11(6). (In Russ.). <https://esj.today/PDF/87SAVN619.pdf>
14. Burghout W., Koutsopoulos H., Andréasson I. Hybrid mesoscopic-microscopic traffic simulation. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2005; 1934(1):218–255. doi:10.3141/1934-23

© Коваценко Игорь Николаевич (igor.kovatsenko@yandex.ru); Печенкин Виталий Владимирович (pechenkinvv@sstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»