

УДК 004.023

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.49.2.006](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.006)

Моделирование трафика на регулируемом перекрестке с использованием сетей Петри с ограничениями на период времени срабатывания переходов

В.В. Печенкин, И.Н. Коващенко✉

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Саратов, Российская Федерация*

Резюме. Исследование оптимизации городских транспортных потоков приобретает особую актуальность в современных условиях стремительной урбанизации и роста числа транспортных средств. Эффективное управление транспортными потоками позволяет не только снизить уровень пробок и заторов, но и улучшить экологическую обстановку в городах, сократить время в пути для водителей и пассажиров, а также повысить безопасность дорожного движения. В статье основное внимание уделяется способам моделирования транспортного потока на примере регулируемого перекрестка. Авторы предлагают метод моделирования дорожного трафика, основанный на использовании сетей Петри с временными ограничениями. Представленный анализ вычислительного эксперимента с использованием предложенной модели демонстрирует ее эффективность в прогнозировании транспортных потоков и выявлении узких мест. Авторы предлагают структуру и правила функционирования элементов сети Петри, что позволяет адаптировать модель к конкретным условиям данного перекрестка. Материалы статьи представляют значительную практическую ценность для решения задач оптимизации транспортных потоков на регулируемых перекрестках. Предложенные методы и модели могут быть использованы городскими планировщиками и инженерами для разработки более эффективных стратегий управления дорожным движением, что в конечном итоге способствует улучшению качества жизни в городах и снижению транспортных заторов. Таким образом, данное исследование вносит важный вклад в развитие теории и практики управления транспортными потоками, предлагая новые инструменты и подходы для решения актуальных проблем городской мобильности.

Ключевые слова: дорожный трафик, регулируемый перекресток, сеть Петри, временные ограничения, мезоскопическая модель.

Для цитирования: Печенкин В.В., Коващенко 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

Traffic modeling at a regulated intersection using Petri nets with constraints on the crossing time period

V.V. Pechenkin, I.N. Kovatsenko✉

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation

Abstract. The study of optimization of urban traffic flows becomes especially relevant in the current conditions of rapid urbanization and growth in the number of vehicles. Effective traffic flow management allows not only to reduce the level of traffic jams and congestion, but also to improve the environmental situation in cities, reduce travel time for drivers and passengers, and improve road safety. This paper focuses on the methods of traffic flow modeling on the example of a regulated intersection. The authors propose a method for modeling traffic flow based on the use of Petri nets with time constraints. The presented analysis of the computational experiment using the proposed model

demonstrates its effectiveness in predicting traffic flows and identifying bottlenecks. The authors propose the structure and rules of functioning of Petri net elements, which allows to adapt the model to the specific conditions of a given intersection. The materials of the paper are of considerable practical value for solving problems of traffic flow optimization at regulated intersections. The proposed methods and models can be used by urban planners and engineers to develop more effective traffic management strategies, which ultimately contributes to improving the quality of life in cities and reducing traffic congestion. Thus, this study makes an important contribution to the development of the theory and practice of traffic flow management, offering new tools and approaches for solving current urban mobility problems.

Keywords: road traffic, controlled intersection, Petri net, time restrictions, mesoscopic model.

For citation: Pechenkin V.V., Kovatsenko I.N. Traffic modeling at a regulated intersection using Petri nets with constraints on the crossing time period. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(2). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1841> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.006

Введение

Управление дорожным трафиком является задачей, которая решается в процессе разработки и эксплуатации транспортных коммуникаций. Основными вопросами являются как аспекты повышения эффективности таких систем, так и вопросы повышения их безопасности [1].

По мере ускорения процессов урбанизации крупные города сталкиваются с радикальным увеличением количества транспортных средств (ТС), снижением эффективности дорожной сети. Отсутствие комплексного подхода к развитию методов анализа структурных характеристик транспортных потоков на различных уровнях приводит к возникновению проблем с функционированием городского транспорта и часто рассматривается как следствие процессов развития городских агломераций [2].

Отдельный интерес в научных исследованиях представляет тематика регулирования режимов работы светофоров на перекрестках с интенсивным движением с целью определения оптимальных временных параметров смены направления движения [3]. Повышение эффективности движения через регулируемый перекресток связано с решением многокритериальной задачи, параметрами которой является время преодоления ТС участка дороги через перекресток, очереди, возникающие при изменении направлений движения. Приведем краткий обзор различных подходов к моделированию и оптимизации трафика через регулируемый перекресток.

Одним из способов оптимизации дорожного трафика на регулируемом перекрестке является модель, основанная на нечеткой логике [4]. Такого рода моделирование наилучшим образом подходит для системы движения, которая перестраивается в зависимости от комплекса параметров (время, день недели, сезон, погода, наличие непредвиденных ситуаций на дороге. Особое значение имеет свойство моделей, реализованных в рамках нечеткой логики, привнесение качественных составляющих в систему моделирования и использование экспертных правил.

При моделировании транспортного потока используется метод имитационного моделирования, который позволяет создать математическую модель элементов транспортной сети и провести вычислительный эксперимент. Особенностью применения программного обеспечения имитационного моделирования является проведение в виртуальной среде исследовательского эксперимента для оптимизации параметров модели, который затратно провести в реальных дорожных условиях. На сегодняшний день существуют решения с достаточно большим набором функционала: такие, как AnyLogic, CORSIM, Paramics Modeller, AIMSUN, SimTraffic, PTV Vision, SUMO [5].

Для оптимизации транспортного потока используется и подход, основанный на нейронных сетях. Такой аппарат удобно использовать в качестве инструментария для разработки контроллеров, определяющих параметры транспортного потока. В работе [6] используются конволюционные нейронные сети (CNN) для распознавания ситуаций в транспортном потоке на скоростных автомагистралях. Результаты в этом случае содержат три категории: затор, много машин и плавный поток. Экспериментальные результаты показывают, что точность характера транспортного потока достигает 92,5 %, что позволяет контролировать количество автомобилей, въезжающих и выезжающих на скоростные магистрали в шлюзах развязки, предотвращая образование пробок.

В данной работе для моделирования транспортного потока используется математический аппарат сетей Петри, которые позволяют адекватно реализовать различные детали функционирования регулируемых перекрестков [7].

Материалы и методы

Сети Петри (СП) представляют собой широко используемый при анализе различных управляющих динамических систем математический аппарат, особенностью которого является ориентация модели на описание потоков ресурсов, информации, проходящих через эту систему. Примеры использования такого подхода предложены в ряде исследований, посвященных анализу расписания движения грузовых транспортных средств [8], моделированию потоков через управляемый перекресток [9–11], разработке систем регистрации параметров трафика [12].

Графическое представление сетей Петри в виде двудольного ориентированного графа обеспечивает удобную визуализацию системы реализуемых отношений. В соответствующем двудольном графе все вершины делятся на два множества – места, на которых размещаются токены (фишки), и переходы, которые инициируют перемещение токенов с набора входных мест на выходные для перехода места. Основные определения используемой модели сети Петри с рядом дополнительных функциональных ограничений представлены в работе авторов [13]. Далее под фишками, которые перемещаются по сети, подразумеваются ТС. В качестве основной математической модели для моделирования перекрестка рассматривается следующая шестерка объектов:

$$PN = (P, T, F, m_0, w, \rho, \sigma), \quad (1)$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ представляет множество мест; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – переходов; отношение $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ определяет связи между вершинами; отображение $m_0 : P \rightarrow \{0\} \cup N$ задает начальную разметку; отображение $w : F \rightarrow N$ задает вес дуги, определяющий характер функционирования перехода (в представленном исследовании веса всех дуг равны 1); последние два элемента определения задают приоритеты переходов $\rho : T \rightarrow \{0\} \cup N$ и ограничения на разрешенное время срабатывания перехода в дискретной временной шкале $\sigma : T \rightarrow \mathcal{P}\{1, 2, 3 \dots\}$.

Если первые пять элементов в формуле (1) представляют обычное определение сети Петри, то последние два являются специфичными для предложенной в работе модели. Отображение ρ используется для определения вероятности выполнения перехода в процессе моделирования.

Отображение σ позволяет определять фазы работы светофоров в дискретной шкале времени, запрещая выполнение перехода $t \in T$ в момент времени

$$i \in \sigma(t). \quad (2)$$

В каждый момент времени i функционирования модели переход t может сработать для текущей разметки m при выполнении следующих условий:

$$m(p) \geq F(p, t), \text{ для всех входных мест } p \in P \text{ перехода } t \quad (3)$$

$$i \notin \sigma(t). \quad (4)$$

Если $T' \subseteq T$ является подмножеством разрешенных для выполнения переходов в некоторый момент времени в соответствии с условиями (3), (4), тогда вероятность выполнения для разрешенного перехода $t \in T'$ в разметке m может быть определена следующим образом:

$$\frac{\rho(t)}{\sum_{t_k \in T'} \rho(t_k)}. \quad (5)$$

При использовании математических методов моделирования дорожного трафика используется ряд стандартных характеристик потока автомобилей, которые включаются как параметры разрабатываемых алгоритмов [14]:

- Объем («поток» или «скорость потока») q – количество транспортных средств в единицу времени, проходящих через заданную точку дороги. Объем может относиться к полосе движения, проезжей части или дороге и, в случае дороги, может включать движение в одном или обоих направлениях. Выражается в количестве автомобилей в единицу времени (ТС/с).

- Плотность («концентрация») k – количество транспортных средств, находящихся на единице длины полосы, проезжей части или дороги в данный момент времени. Плотность выражается в количестве транспортных средств на единицу расстояния (ТС/м).

- Скорость v – расстояние, пройденное транспортным средством за единицу времени (м/с).

- Средняя скорость по времени v_{time} , представляет собой среднее арифметическое значение измеренных скоростей всех транспортных средств, проезжающих мимо данной точки в течение заданного интервала времени.

- Пространственная средняя скорость v_{space} , – среднее арифметическое значение измеренных скоростей всех транспортных средств в пределах данной длины полосы или проезжей части в данный момент времени. Объем в этом случае вычисляется следующим образом:

$$q = k \cdot v_s. \quad (6)$$

- Средний интервал следования («headway») h – интервал времени, разделяющий прохождение фиксированной точки двумя последовательными транспортными средствами в транспортном потоке. Выражается в единицах времени на транспортное средство (с/ТС). Объем и средний интервал следования являются взаимно обратными величинами:

$$q = 1/h \text{ и } h = 1/q. \quad (7)$$

- Дистанция («spacing») s – расстояние между передними частями двух следующих друг за другом автомобилей в транспортном потоке в данный момент времени. Выражается в единицах расстояния на транспортное средство (м/ТС). Производной от этой величины является среднее расстояние. Плотность и дистанция между автомобилями обратны друг другу (обычно эти величины усредняются):

$$k = 1/s \text{ и } s = 1/k. \quad (8)$$

- Занятость полосы движения – доля времени, в течение которого в заданном интервале времени в определенной точке полосы движения находится транспортное средство. Выражается безразмерной величиной.

Определенные выше величины позволяют использовать дополнительные соотношения. Например,

$$q = v/s, \quad (9)$$

$$s = h \cdot v. \quad (10)$$

Пусть значения $v_j, j=1, \dots, N$ – это скорости N автомобилей в транспортном потоке, измеренные при прохождении ими заданной точки в течение единичного интервала времени. Средняя по времени скорость представляет собой среднее арифметическое значение скоростей:

$$v_t = \sum_{j=1}^N \frac{v_j}{N}. \quad (11)$$

Можно считать, что транспортный поток состоит из n составляющих подпотоков. $l = 1, \dots, n$, где l -й подпоток имеет объем q_l и все автомобили в подпотоке имеют одинаковую скорость v_l . В этом случае плотность k_l подпотока l определяется следующей формулой:

$$q_l = v_l \cdot k_l. \quad (12)$$

Если на единичном отрезке длины дороги в данный момент времени находится k_l автомобилей из подпотока l , движущихся со скоростью v_l для всех, пространственная средняя скорость вычисляется по формуле:

$$v_s = \frac{\sum_{l=1}^n k_l \cdot v_l}{\sum_{l=1}^n k_l} = \frac{\sum_{l=1}^n q_l}{\sum_{l=1}^n \frac{q_l}{v_l}} = \frac{N}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{v_j}}. \quad (13)$$

Предполагаем далее, что все генераторы (переходы без входных мест) и стоки (переходы без выходных мест) сети Петри делятся на четыре упорядоченных подмножества (Север – Восток – Юг – Запад) по разным направлениям движения, образуя подмножества, соотнесенные со сторонами света и полюсами дорожной сети перекрёстка. На Рисунке 1 эти переходы представляют полосы движения N_n, S_n, W_n, E_n ($n = 1 \dots 4$), которые соответствуют северному, южному, западному и восточному полюсам сети.

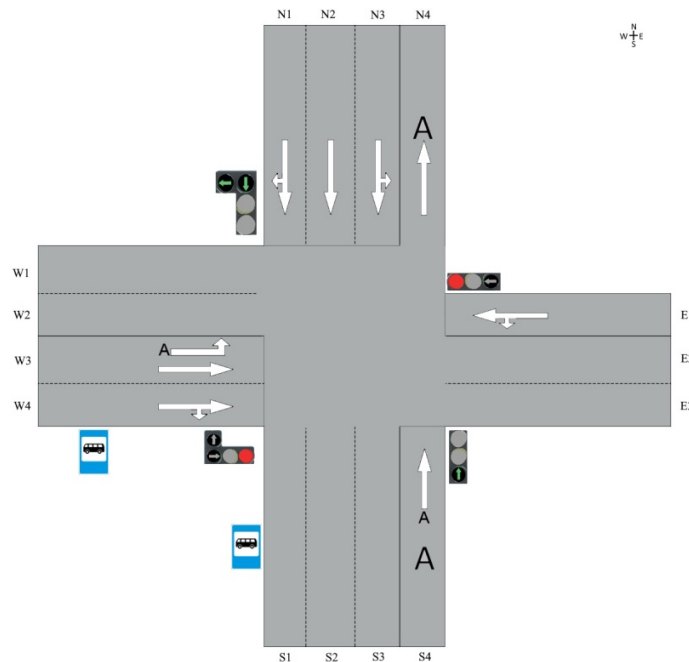


Рисунок 1 – Схема перекрестка
Figure 1 – Intersection diagram

Функционирование перекрестка разбивается на последовательность фаз, которые определяют разрешенные направления движения. Для моделирования такой последовательности используются ограничения по времени, задаваемые отображением σ . Направления движения по полосам через перекресток определяются тремя последовательными фазами (Рисунок 2).

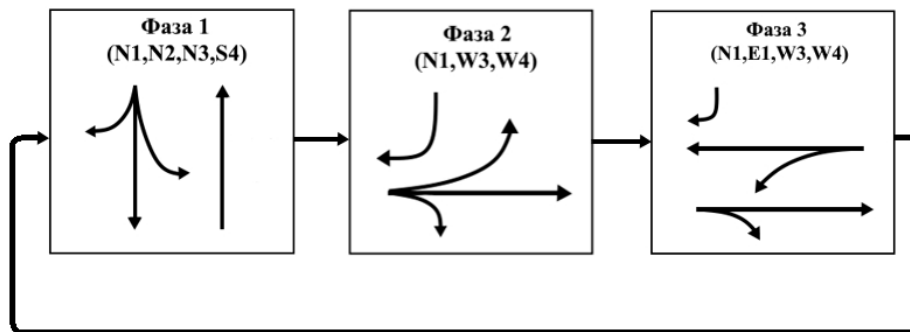


Рисунок 2 – Схема переключений фаз светофоров на перекрестке
Figure 2 – Diagram of traffic lights phase switching at the intersection

В течение фазы 1 разрешено движение ТС по полосам N_1 , N_2 , N_3 и S_4 прямо, поворот направо в полосу W_1 из N_1 , или налево из полосы N_3 . Во временной промежуток, заданный для этой фазы, ТС на участках (E_1 , W_3 , W_4) запрещено выезжать на перекресток. Рисунок 3 представляет возможные направления движения и состояние сигналов светофоров в фазе 1.

В течение фазы 2 разрешено движение ТС по полосам W_3 и W_4 , общественному транспорту в полосе W_3 разрешен поворот налево в полосу N_4 . Кроме этого, разрешен поворот направо из полосы N_1 в W_1 . ТС в полосах движения N_2 , N_3 , S_4 и E_1 запрещен выезд на перекресток.

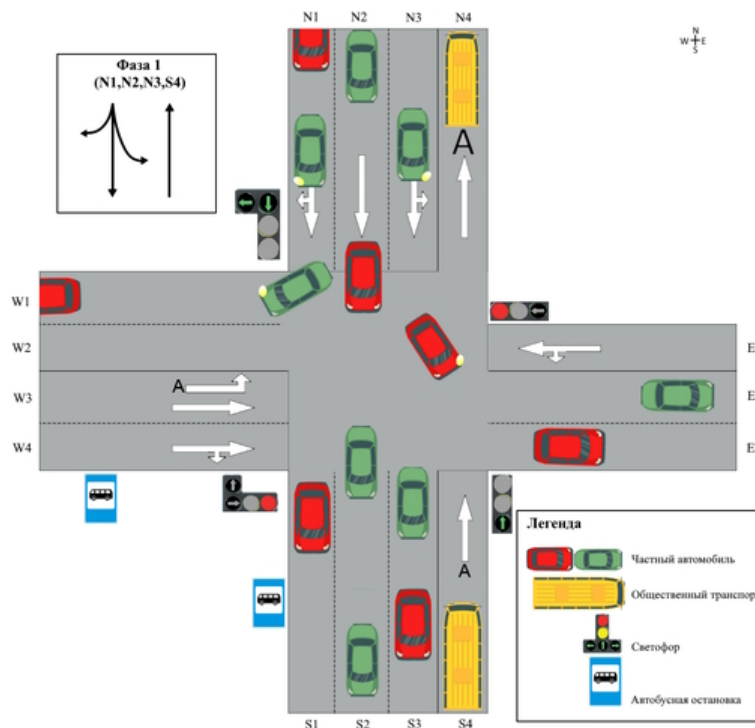


Рисунок 3 – Схема перекрестка в фазе 1
Figure 3 – Schematic of the intersection in phase 1

При приближении к перекрестку возможно перестроение ТС из полосы в соседнюю разрешенную полосу. ТС, которые приближаются к N_1 , N_2 , N_3 , могут осуществлять поворот направо из крайней правой полосы, налево из крайней левой полосы или продолжать движение прямо из любой из полос.

На Рисунке 4 показана разработанная сеть Петри, которая используется для моделирования функционирования трафика ТС. Для участка сети, моделирующего северное направление перекрестка (окрашено в синий цвет), входные потоки для соответствующих полос движения задаются генераторами, имеющими в качестве параметров вероятности их срабатывания, которые представлены переходами сети без входных мест (N_{1src} , N_{2src} , N_{3src}). Вероятности срабатывания переходов сети Петри определяются параметром «приоритет», задаваемым для переходов в используемом программном обеспечении (grin-software.net). Транспортные средства, покидающие перекресток через северный участок представлены переходом N_{4out} . Для южного, восточного и западного направлений (розовый, зеленый и желтый цвет) входные потоки представлены переходами S_{4src} , E_{1src} и W_{1src} ($i = 1, 2$), а выезды с соответствующих направлений переходами S_{iout} , E_{iout} и W_{iout} . Переходы вида $N_{igo}N_j$ соответствуют моментам перестроения ТС между полосами движения при приближении к перекрестку.

Предложенная модель является моделью мезоскопического уровня моделирования транспортных потоков, так как совмещает в себе описание направления движения ТС и характеристик потоков между ключевыми точками транспортной сети [15, 16].

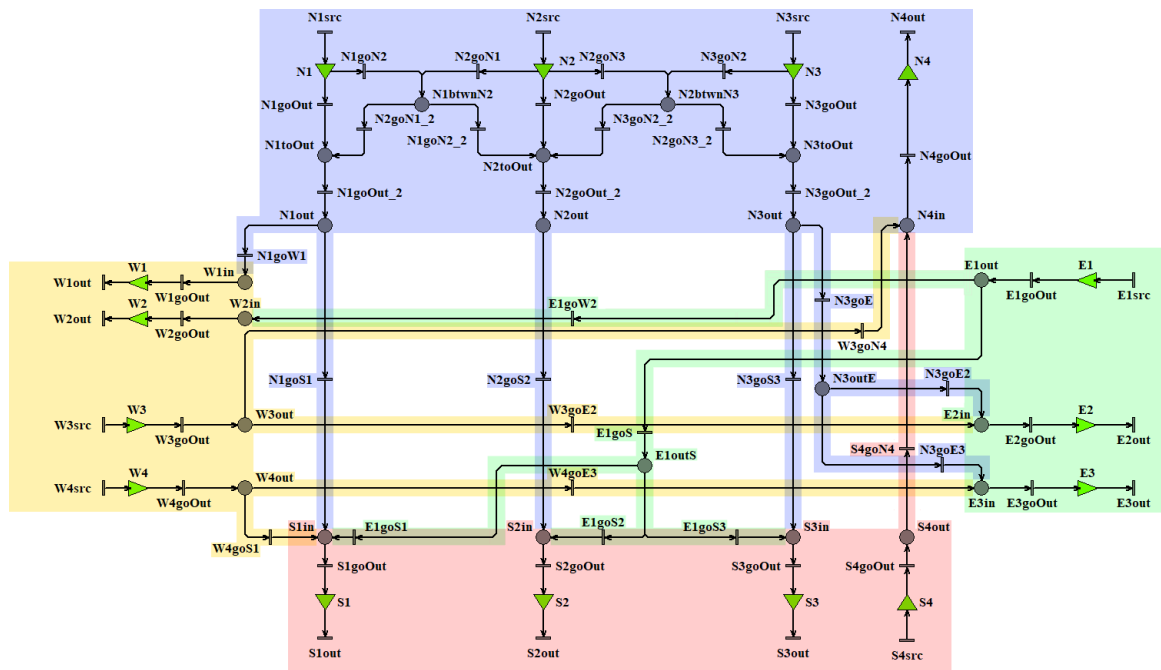


Рисунок 4 – Сеть Петри для перекрестка с цветовым выделением секций

Figure 4 – Petri net for an intersection with color-coded sectioning

Подход к верификации модели

Процесс калибровки модели заключается в определении временных интервалов активности фаз и определение приоритетов срабатывания переходов для каждой фазы движения по перекрестку. Результатом калибровки является способность модели отразить реальные характеристики транспортного потока на перекрестке. Процесс верификации модели представляет собой комплекс мер, которые проверяют выполнение

критериев адекватности, перечисленные для разрабатываемой модели до калибровки. Для разработанной модели определены следующие критерии адекватности:

1. Для каждого места отсутствует накопление токенов, превышающее количество транспортных средств, способных занять участок перекрестка, отраженный рассматриваемым местом, это условие определяется следующим образом:

$$\forall x \in P \quad k_x \leq cap_x, \quad (14)$$

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

2. В процессе калибровки, при определении оптимального момента времени завершения фазы, сумма дельт (разница числа срабатываний переходов на выходах с перекрестка и числа реальных проездов в течении фазы) должна быть минимальной:

$$\sum \Delta(act_{\text{вых}} - psg_{\text{вых}}) \rightarrow \min, \quad (15)$$

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

3. В каждой фазе отношение общего числа переходов симуляции и длительности фазы должно быть в пределах допустимой погрешности ε :

$$\frac{act_{\text{общ}}}{t_{\text{фаз}}} \leq \varepsilon, \quad (16)$$

где $act_{\text{общ}}$ – общее число переходов симуляции; $t_{\text{фаз}}$ – длительность фазы.

4. В процессе калибровки, на местах, которые являются точками пересечения следования транспортных средств нескольких направлений, задействованных в разные фазы, не должно происходить накопление токенов, если это место не могло быть задействовано в предыдущей фазе. То есть должно выполняться условие:

$$(P_{lst} \subseteq P) \wedge (P_{crs} \subseteq P) \wedge (P_{crs} \cap P_{lst} = \emptyset) \wedge (\forall x \in P_{crs}, k_x = 0), \quad (17)$$

где P – множество мест, задействованных в предыдущей фазе; P_{lst} – 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 .

Результаты

На Рисунке 5 изображена диаграмма накопления токенов в местах на фрагменте симуляции для секции W . Закрашенная область отображает количество транспортных средств на участке. Линии графика отражают приток и отток ТС на участке перекрестка с течением времени. На протяжении симуляции для секции W не наблюдается деградация накопления токенов – превышение допустимого числа транспортных средств на одной полосе в любой момент времени. Каждая из полос имеет запас длины 80 метров, равный длине отрезка дороги между двумя перекрестками. При средней длине легкового автомобиля 4,9 метра, сумма транспортных средств на местах каждой полосы не должна превышать 16 автомобилей. На диаграмме видно, что максимальное значение суммы токенов (ТС) для двух полос будет составлять 5 для полосы W_3 и 4 для полосы W_4 .

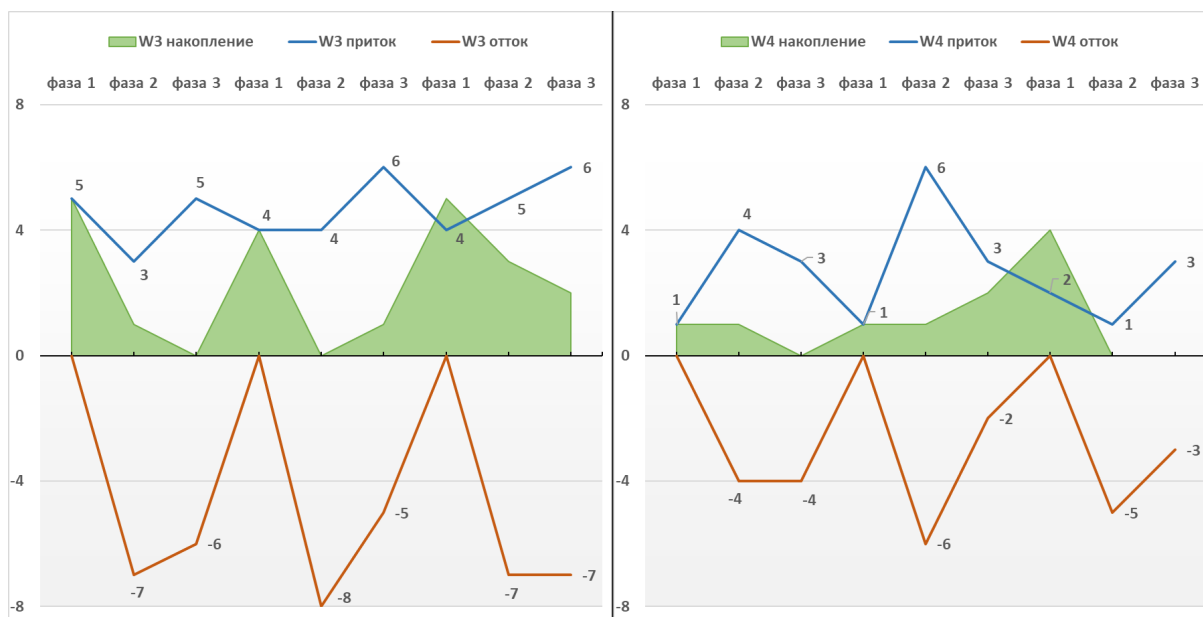


Рисунок 5 – Диаграмма накопления токенов в местах для секции *W*
Figure 5 – Diagram of token accumulation in places for section *W*

На Рисунке 6 изображена диаграмма срабатываний переходов на фрагменте симуляции для въезда на перекресток с секции *E*, где ось *Y* отражает количество срабатываний переходов, а ось *X* обозначает фазу. Пары столбиков показывают сравнение фактического и ожидаемого количества срабатываний переходов для каждой фазы фрагмента симуляции. Левый столбик – наблюдаемое количество переходов; правый – ожидаемое.

Ожидаемое значение проездов считается как среднее значение проездов, наблюдаемых на реальном перекрестке в заданный временной интервал в течение длительного времени. Для рассматриваемой симуляции ожидаемые значения проездов равны 5, 3, 10 для 1-й, 2-й, 3-й фаз, соответственно. На протяжении симуляции для секции *E* не наблюдается отклонения количества срабатываний переходов от ожидаемого значения в пределах допустимого значения. Важно отметить, что во время наблюдения за перекрестком отсутствовали чрезвычайные ситуация (аварии, пробки и т. п.), что может быть отражено в модели на уровне определения фаз и приоритетов переходов.

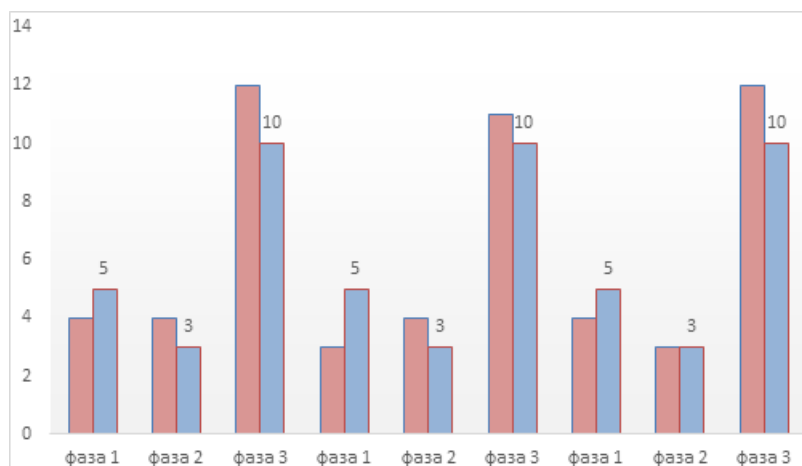


Рисунок 6 – Диаграмма срабатывания переходов для секции *E*
Figure 6 – Firing transition diagram for section *E*

Обсуждение

Адекватность модели подтверждается ее поведением при анализе результатов вычислительного эксперимента. Такой вывод подтверждается поведением сети Петри с наложенными ограничениями, выполнением критериев калибровки и верификации модели (14)–(17).

Для моделирования трафика используется сеть Петри без определения времени срабатывания переходов (в этом случае говорят о временных сетях Петри), поэтому затруднительно соотнести отдельный шаг выполнения перехода с временным интервалом завершения маневра разными типами ТС (автобус, легковой автомобиль), и, как следствие, определить число срабатываний переходов, которое необходимо выполнить в течение активации фазы перекрестка. Для определения срабатывания перехода, на котором фаза считается завершенной, необходимо сформулировать условия завершения активности фазы. Таким условием является соответствие состояния фазы в выбранный шаг калибровочному набору характеристик перекрестка, которые представлены обобщенным результатом наблюдения за реальным состоянием перекрестка в течение некоторого промежутка времени.

Процесс калибровки модели в ручном режиме осложнен тем, что ее неадекватность может проявляться не сразу, а через несколько десятков прогонов полного цикла работы перекрестка. В этом случае возникает необходимость корректировки приоритетов переходов и повторный запуск модели. Одним из возможных направлений исследования является разработка методов автоматической калибровки модели с использованием подходов, основанных на машинном обучении.

Используемая модель предполагает условности при расчетах емкости линейных участков дорожного полотна по отношению к длине ТС. В качестве средней длины используется длина легкового автомобиля, не учитываются микроавтобусы, маршрутные такси, автобусы и троллейбусы. Эту условность можно считать незначимой, так как каждый отрезок дороги, который отражает секцию въезда на перекресток, значительно превышает вместимость для максимальных значений количества автомобилей в очереди на въезд на перекресток на протяжении симуляции при работе перекрестка в штатном режиме. Одним из способов учета длины ТС может быть типизация токенов при использовании цветной сети Петри. Переход к такой модели позволит учитывать типы ТС, но связан с определенными трудностями [17].

В качестве перспективы процесса использования предложенного подхода к моделированию может рассматриваться инструментарий, позволяющий автоматически калибровать модель с помощью процедур определения параметров онлайн трафика, подсчета проезда транспортных средств на перекрестке. Такой инструментарий позволит формировать массив статистических данных о распределении вероятностей о направлении и количестве движения ТС на протяжении заданного периода времени. Это должно улучшить адекватность модели, так как с течением времени на характеристики транспортных потоков влияют сезонные изменения, погодные и климатические явления, наличие систематических значимых изменений в трафике транспортных средств, например, перекрытие улиц города для регулярных мероприятий.

Заключение

В статье предложено решение задачи моделирования транспортного потока на регулируемом перекрестке. Используется подход к моделированию, который основан на математическом аппарате сетей Петри с дополнительными ограничениями на функционирование модели (приоритеты выполнения переходов, временные ограничения на время срабатывания переходов). В статье описывается структура

предложенной сети Петри, учитывающая параметры конкретного перекрестка, предложена процедура калибровки модели и результаты моделирования, которые демонстрируют адекватность подхода с точки зрения устойчивого поведения параметров транспортного потока, близкого к параметрам функционирования реального перекрестка.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Jeng A.A.-K., Jan R.-H., Chen Ch., Chang T.-L. Adaptive Urban Traffic Signal Control System with Bus Priority. In: *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 02–05 June 2013, Dresden, Germany*. IEEE; 2014. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2013.6691860>
2. Cheshmehzangi A., Ardakani S.P. Urban Traffic Optimization Based on Modeling Analysis of Sector-Based Time Variable: The Case of Simulated Ningbo, China. *Frontiers in Sustainable Cities*. 2021;3. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.629940>
3. Hassan M.N., Hawas Ya.E. A methodology for rearranging transit stops for enhancing transit users generalized travel time. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2017;4(1):14–30. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.012>
4. Yadav V., Tripathi J.P., Thakur Bh.K. Traffic Light Optimization using Fuzzy Logic and Genetic Algorithm. *Mathematical Statistician and Engineering Applications*. 2022;71(4):10705–10712.
5. Николаева Р.В., Вятскина Д.В. Оптимизация транспортных потоков на регулируемом пересечении. *Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура*. 2023;(1):41–48.
Nikolaeva R.V., Vyatskina D.V. Optimization of Traffic Flows at a Regulated Intersection. *Roads and Transport Infrastructure*. 2023;(1):41–48. (In Russ.).
6. Lu Ch.-T., Huang Yu, Lin J.-A., Wang L.-L. Identification of Traffic Flow Using Multi-Convolutional Neural Networks. *International Journal of Network Security*. 2022;24(4):747–754. [https://doi.org/10.6633/IJNS.202207_24\(4\).18](https://doi.org/10.6633/IJNS.202207_24(4).18)
7. Lamghari Elidrissi H., Nait Sidi Moh A., Tajer A. Modular Design and Adaptive Control of Urban Signalized Intersections Systems Using Synchronized Timed Petri Nets. *Computing and Informatics*. 2022;41(2):590–608. https://doi.org/10.31577/cai_2022_2_590
8. 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
9. Dicesare F., Kulp P.T., Gile M., List G. The Application of Petri Nets to the Modeling, Analysis and Control of Intelligent Urban Traffic Networks. In: *Application and Theory of Petri Nets 1994: 15th International Conference, 20–24 June 1994, Zaragoza, Spain*. Heidelberg; Berlin: Springer; 1994. P. 2–15. https://doi.org/10.1007/3-540-58152-9_2
10. Liang X., Dang Yu., Hou Yi. Modeling and Analysis of Urban Traffic System Based on Colored Petri Nets. In: *2021 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 03–05 December 2021, Xiamen, China*. IEEE; 2021. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICNSC52481.2021.9702178>
11. Qi H.-Sh., Yu Yi, Tang Q., Hu X.-B. Intersection Traffic Deadlock Formation and its Probability: a Petri Net-Based Modeling Approach. *IET Intelligent Transport Systems*. 2022;16(10):1342–1363. <https://doi.org/10.1049/itr2.12210>

12. 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.
13. Li R., Wang Sh., Jiao P., Lin Sh. Traffic Control Optimization Strategy Based on License Plate Recognition Data. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2023;10(1):45–57. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.12.004>
14. Bennett D. *Guide to Traffic Management: Part 2: Traffic Theory*. Sydney: Austroads; 2008. 122 p.
15. Печенкин В.В., Коваценко И.Н. Стохастическое моделирование дорожного трафика на регулируемом перекрестке. В сборнике: *Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: материалы XIX Международной научно-практической конференции, 13–14 апреля 2023 года, Саратов, Россия*. Саратов: ИЦ «Наука»; 2023. С. 293–300.
16. Тимкова А.Ю. Имитационное моделирование динамического изменения пассажиропотока в метрополитене. *Вестник транспорта Поволжья*. 2023;(1):76–80.
17. Климов А.В. Цветные сети Петри и язык распределенного программирования UPL: их сравнение и перевод. *Программные системы: теория и приложения*. 2023;14(4):91–122. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2023-14-4-91-122>
Klimov A.V. Coloured Petri Nets and the Language for Distributed Programming UPL: Their Comparison and Translation. *Program Systems: Theory and Applications*. 2023;14(4):91–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2023-14-4-91-122>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Печенкин Виталий Владимирович, доктор социологических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация.
e-mail: pechenkinvv@sstu.ru

Vitaly V. Pechenkin, Doctor of Sociological Sciences, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation.

Коваценко Игорь Николаевич, аспирант, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация.
e-mail: igor.kovatsenko@yandex.ru

Igor N. Kovatsenko, Postgraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 12.03.2025; одобрена после рецензирования 08.04.2025; принята к публикации 14.04.2025.

The article was submitted 12.03.2025; approved after reviewing 08.04.2025; accepted for publication 14.04.2025.