



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-74-81>

*Оригинальная статья*

*Original paper*

УДК 51-74

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ИГР ПРИ РАЗРАБОТКЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

Н. С. ЯНКЕВИЧ

*Центр системного анализа и стратегических исследований Национальной академии наук Беларуси  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 12.09.2023*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** Управление дорожным движением в современных интеллектуальных транспортных системах включает в себя мониторинг фактической дорожной ситуации в режиме реального времени (объемы, скорости, инциденты и т. д.), а также контроль или влияние на поток с использованием этой информации. При этом автомобили как компоненты интеллектуальных транспортных систем должны быть оснащены коммуникационными возможностями для обмена информацией с другими транспортными средствами (V2V) и с дорожной инфраструктурой (V2I). Все это связано с наличием специального оборудования, подключенного к бортовой сети для локального сбора данных, которые могут быть доступны для обмена между автомобилями и с центральной коммуникационной станцией с помощью беспроводного интернета. Вместе с тем вопрос разработки самих алгоритмов организации движения пока остается открытым. Решение этой задачи можно осуществить с помощью теории игр – достаточно новой, но бурно развивающейся части современной математики. В отличие от теории оптимизации, изучающей возможности построения оптимального решения для всей системы в целом, теория игр изучает способы оптимизации индивидуальной выгоды в конкуренции с другими лицами (событиями), которые рационально стремятся к удовлетворению собственной выгоды. Проблема «умного» регулирования перекрестков является достаточно сложной для решения задачи, объединяющей усилия ученых разных областей знаний. Однако бурное развитие ИКТ-технологий и быстрое их применение к транспортным задачам дает возможность выработать некоторые подходы, позволяющие оптимизировать текущую ситуацию на перекрестке.

**Ключевые слова:** интеллектуальная транспортная система, транспортный поток, транспортный перекресток, теория игр.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Янкевич, Н. С. Применение теории игр при разработке алгоритма управления транспортными потоками в интеллектуальной транспортной системе / Н. С. Янкевич // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 1. С. 74–81. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-74-81>.

## THE GAME THEORY APPLICATION IN THE TRANSPORT FLOWS CONTROL ALGORITHM DEVELOPMENT IN THE INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEM

NATALLIA S. YANKEVICH

*Center for System Analysis and Strategic Research of the National Academy of Sciences of Belarus  
(Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 12.09.2023*

**Abstract.** Traffic management in modern intelligent transport systems includes monitoring the actual traffic situation in real time (volumes, speeds, incidents, etc.) and management or controlling transport traffic using this information. At the same time, cars as intelligent transport systems components must be equipped with communication capabilities for exchanging information with other vehicles (V2V) and with road infrastructure (V2I). All this is connected with the presence of special equipment connected to the on-board network for local data collection, which can be exchanged between cars and with a central communication station using wireless Internet. At the same time, the issue of developing the traffic organization algorithms themselves is still open. This problem can be solved with the help of game theory, a fairly new but rapidly developing part of modern mathematics. Unlike optimization theory, which studies the possibilities of constructing an optimal solution for the entire system as a whole, game theory studies ways to optimize individual benefits in competition with other persons (events) that rationally seek to satisfy their own benefits. The problem of “smart” regulation of intersections is quite difficult to solve, it combines the efforts of scientists from different fields of knowledge. However, the rapid development of ICT technologies and their rapid application to transport tasks makes it possible to develop some approaches to optimize the current situation at the intersection.

**Keywords:** intellectual transport system, traffic flow, traffic intersection, game theory.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Yankevich N. S. (2024) The Game Theory Application in the Transport Flows Control Algorithm Development in the Intelligent Transport System. *Doklady BGUIR*. 22 (1), 74–81. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-74-81> (in Russian).

### Введение

Современные технологии, позволяя улучшить управление движением транспорта в режиме реального времени и повышая его экологичность, являются основой внедрения новых услуг и сервисов. В дополнение к очевидным преимуществам для транспортных операторов и клиентов новые логистические системы (в частности, интеллектуальные транспортные системы, ИТС) обеспечат введение государственного администрирования оперативной информацией, в том числе данными о потребностях в инфраструктуре и техническом обслуживании.

Развитие открытой архитектуры обеспечит интероперабельность и гибкое развитие различных приложений для будущих видов транспорта. Структура системы автоматизированного управления транспортными потоками с использованием современных коммуникационных и информационных технологий является инвариантной как технологически универсальная, поскольку обладает преемственностью в протоколах сопряжения с существующими автоматизированными системами управления движением транспорта за счет открытости их системных архитектур. Вместе с тем вопрос разработки самих алгоритмов организации движения пока остается открытым. Решение этой задачи можно осуществить с помощью теории игр – бурно развивающегося раздела современной математики. В отличие от теории оптимизации, изучающей возможности построения оптимального решения для всей системы в целом, теория игр изучает способы оптимизации индивидуальной выгоды в конкуренции с другими лицами (событиями), которые рационально стремятся к удовлетворению собственной выгоды.

Проблема «интеллектуального» регулирования перекрестков является достаточно сложной задачей, для решения которой необходимо объединить усилия ученых разных областей знаний. Однако бурное развитие ИКТ-технологий и быстрое их применение к транспортным задачам дает возможность выработать достаточно эффективные подходы к ее решению.

## Состояние вопроса

Сложность анализа движения городского транспорта позволяет рассматривать разработку и внедрение интеллектуальных транспортных систем как решение многостадийной задачи, одним из важнейших этапов которого является разработка математических моделей оптимального безаварийного движения транспортных средств, в том числе регулирования перекрестков. Основные перспективы развития средств автоматизации управления движением транспорта в настоящее время – это технологии разработки современных дорожных контроллеров, а также оперативная связь между ними и Центром обработки данных. Практическая реализация указанных подходов основана на современных коммуникационных технологиях, обеспечивающих передачу данных между автомобилями – V2V (Vehicle-to-Vehicle), между автомобилями и дорожной инфраструктурой – V2I (Vehicle-to-Infrastructure) или (как в последней из рассмотренных систем) внутри инфраструктуры (внутри сети «интеллектуальных» светофоров) и базирующихся на стандартах беспроводной связи DSRC (Dedicated Short-Range Communications), WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) IEEE 802.11p.

Существуют разные подходы к решению этой задачи. Однако особенно интересна задача по регулированию движения, реализованная в системе MARLIN-ATSC (Multiagent Reinforcement Learning for Integrated Network of Adaptive Traffic Signal Controllers, Торонто). В этой разработке отказались от централизованной системы – она заменена на светофоры-агенты (устройства, которые наделены искусственным интеллектом и общаются между собой для выбора схемы движения). В программе, которую загружают в каждый светофор, описан марковский процесс принятия решений, а именно, его частный случай – Q-обучение. Этот принцип машинного обучения предполагает общение агента (светофора) с системой (дорожным движением). Каждое действие светофора каким-то образом влияет на дорожную ситуацию, об изменении которой можно судить по информации, получаемой с датчиков. Получив эту информацию (так называемое вознаграждение), светофор-агент вычисляет функцию своей полезности Q и в дальнейшем опирается на приобретенный опыт<sup>1</sup>. Рассматриваемое решение требует проведения исследований отечественными математическими школами.

## Разработка алгоритма

Для автомобильного транспорта тактическое управление дорожным движением включает в себя мониторинг фактической дорожной ситуации в режиме реального времени (включая объемы, скорости, происшествия и т. д.), а затем контроль или влияние на поток с использованием этой информации, чтобы уменьшить заторы, справиться с инцидентами, улучшить эффективность, безопасность, экологические показатели и т. д. [1, 2]. В более широком масштабе стратегическое управление трафиком включает в себя управление целыми сетями на макроуровне (общая операционная политика), а также интеграцию или соединение различных сетей. Однако городские транспортные потоки обладают следующими специфическими свойствами:

- стохастичностью (их характеристики позволяют прогнозировать только с определенной вероятностью. Транспортный поток движется по транспортной сети, которая имеет определенные характеристики, допускающие более или менее строгое описание, и не является стационарной);
- нестационарностью транспортных потоков (колебания их характеристик происходят как минимум в трех циклах: круглосуточном, еженедельном, сезонном);
- несовершенной управляемостью (даже при наличии полной информации о транспортных потоках и возможности информирования водителей о необходимых действиях эти требования носят лишь рекомендательный характер, поэтому достижение глобального экстремума любого критерия управления весьма проблематично);
- множественностью критериев исследования (средняя скорость движения, прогнозируемое количество происшествий, объем вредных газов в атмосфере и т. п. Большинство этих критериев взаимосвязаны, и выбрать какой-то один очень сложно);
- сложностью учета даже основных характеристик, определяющих качество управления транспортными потоками. Так, оценка интенсивности движения транспорта требует либо использования данных аэрофотосъемки, либо проведения весьма трудоемкого ручного контроля и т. п.

<sup>1</sup> Зеленский, М. Что и требовалось разрулить: как математика борется с дорожными заторами [Электронный ресурс] / М. Зеленский. Режим доступа: <https://lenta.ru/articles/2013/12/04/traffic/>. Дата доступа: 04.12.2013.

Таким образом, проблема «умного» регулирования перекрестков является достаточно сложной для решения задачи, объединяющей усилия ученых в разных областях знаний. Типичной базой для моделирования транспортировки товаров является сеть, состоящая из звеньев и узлов, представляющих соответственно дороги и перекрестки. В большинстве случаев предпринимаются попытки снизить трудоемкость расчетов за счет учета только наиболее важных факторов при въезде на перекресток. С этими упрощениями можно моделировать такие процессы, как поворот налево против встречного движения, но решение о последовательности действий должно быть принято до входа автомобиля в поворот. При этом расчетные прогнозы, будучи безусловно необходимыми, обладают не столь высокой достоверностью (за исключением случаев, когда использовался большой экспериментальный опыт). Попытки некоторых специалистов уже на этапе разработки с высокой достоверностью предсказать оптимальное решение транспортных потоков только расчетным путем свидетельствуют о крайнем оптимизме и должны быть оценены соответствующим образом. Обобщение статистических данных и результатов наблюдений единичной ситуации или единичного объекта (перекрестка) очень важны для адаптации чисто математического моделирования к конкретным условиям. На этой основе должны рассчитываться вероятностные оценки, относящиеся к конкретной ситуации или конкретному объекту.

В основе современных автоматизированных систем управления дорожным движением, обеспечивающих минимизацию функционала, лежит модель очереди. В общем случае динамика очереди базируется на представлении регулируемого направления как системы массового обслуживания [3]:

$$A(t) = \int_0^t q(t) dt; \quad (1)$$

$$D(t) = \int_0^t S(t) dt; \quad (2)$$

$$Q(t) = Q(0) + A(t) - D(t); \quad (3)$$

$$d = \frac{1}{A(T)} \int_0^T Q(t) dt, \quad (4)$$

где  $A(t)$  – кумулятивное число прибытий;  $q(t)$ ,  $S(t)$  – интенсивность прибытия и разезда транспортных средств соответственно;  $D(t)$  – число обслуживаний в течение периода  $[0, t]$  при наличии остаточной очереди  $Q(0)$ ;  $Q(t)$  – текущее количество транспортных средств в системе;  $d$  – средняя задержка транспортных средств в течение периода  $[0, T]$ .

Графическая интерпретация модели приведена на рис. 1. При этом следует отметить, что функции  $A(t)$ ,  $D(t)$ ,  $Q(t)$  носят вероятностный характер.

В условиях заторов, как правило, используют различные экспертные системы, задачами которых являются идентификация транспортной ситуации и применение соответствующей стратегии управления [1–4]. Вместе с тем подход, основанный на построении именно сети «интеллектуальных» светофоров, обменивающихся информацией, представляет значительный интерес.

Рассмотрим решение задачи в общей постановке. Типовая схема движения на перекрестке представлена на рис. 2. Следует подчеркнуть, что современные средства диагностики и использования или радиотрансляции соответствующих данных V2I или V2V позволяют достаточно точно определять все данные, необходимые для анализа транспортных потоков. В этом случае цель управления транспортными потоками на перекрестке можно сформулировать следующим образом: должно быть определено оптимальное время зеленого сигнала светофора для каждой транспортной полосы, чтобы среднее время задержки по направлениям, описываемое формулой (4), было минимальным. Задержка движения транспортных потоков определяется задержками движения в направлениях  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{22}$ , причем ее оптимальное значение можно считать выигрышем в игре с ненулевой суммой. Оценка выигрыша (величины задержки транспортного потока) может осуществляться с точки зрения теории минимакса (нижняя граница оценки – минимальный, но гарантированный выигрыш), а также с точки зрения построения равновесного решения (такая стратегия, согласно которой любая попытка любого игрока изменить свою стратегию, когда его партнер настаивает на первоначальном выборе, не приведет к увеличению выигрыша игрока, нарушающего стратегию).

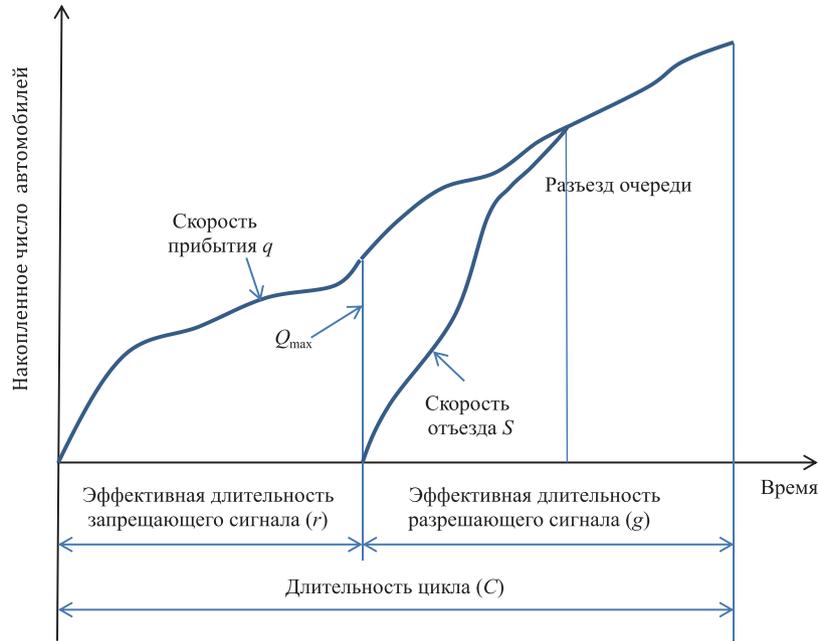


Рис. 1. Графическая интерпретация образования транспортной очереди  
Fig. 1. Graphical interpretation of transport queue formation

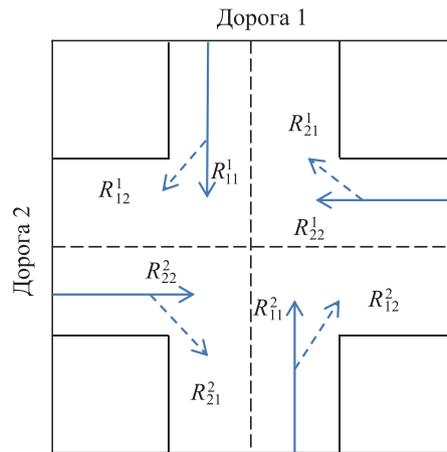


Рис. 2. Схема движения транспорта на перекрестке  
Fig. 2. The scheme of traffic at the intersection

Разработаем платежную матрицу для этой формулировки

$$\begin{array}{c}
 \text{Дорога 1} \\
 \left[ \begin{array}{cc}
 R_{11} & R_{12} \\
 R_{21} & (d_{11}^1, d_{11}^2) \\
 R_{22} & (d_{21}^1, d_{21}^2)
 \end{array} \right] \begin{array}{c}
 \text{Дорога 2} \\
 R_{12} \\
 (d_{12}^1, d_{12}^2) \\
 (d_{22}^1, d_{22}^2)
 \end{array}
 \end{array} \quad (5)$$

где  $d_{ij}$  – суммарная задержка движения, вычисляемая по формулам (1)–(4) для соответствующих полос.

Анализ платежной матрицы проводится известными методами. Предпочтения игроков обычно обозначаются стрелками (направление – от меньшего к большему выигрышу). Точка равновесия определяется как точка, на которую указывают вертикальные стрелки (предпочтения первого игрока первой стратегии вследствие связанного с ней большего выигрыша), а также горизонтальная (предпочтения второго игрока). Очевидно, что в соответствии с такой формулировкой точки равновесия  $A, B$  можно найти по формулам:

$$A = \max_i \{d_{(i,j)}^{(j)}\};$$

$$B = \min_j \{d_{(i,j)}^{(i)}\}, i, j = \overline{1,2}. \quad (6)$$

Гарантированный уровень и максиминная стратегия могут быть определены при незнании действий другого игрока. Однако, основываясь на таком методе построения матрицы выигрышей, можно получить, что результаты теории максимина идентичны точке равновесия. Остается открытым вопрос, в каком смысле выигрыш и соответствующая ему стратегия являются лучшими. Считается, что игрок гарантирует себе максимальный (а, возможно, и самый крупный) выигрыш, используя равновесную стратегию [5]. После определения равновесной стратегии (и, следовательно, до максимального гарантированного выигрыша, например, времени задержки транспортных средств, движущихся в соответствующих направлениях) можно сделать вывод о наиболее значимых задержках движения транспорта для сложившейся транспортной ситуации.

Для рис. 2 средняя задержка движения автомобилей на перекрестке по полосам указана в табл. 1.

**Таблица 1.** Распределение средних задержек движения транспорта на перекрестке по полосам  
**Table 1.** Distribution of average traffic delays at an intersection by lanes

Полоса движения / Lane	Движение / Movement	Средняя задержка движения, мин / Average traffic delay, min
$d_{11}^1$	Прямо	1,0
$d_{11}^2$	Прямо	2,0
$d_{12}^1$	Поворот направо	2,0
$d_{12}^2$	Поворот направо	1,0
$d_{22}^1$	Прямо	3,0
$d_{22}^2$	Прямо	0
$d_{21}^1$	Поворот направо	2,0
$d_{21}^2$	Поворот направо	1,0

Следует отметить, что современные средства информационно-коммуникационных технологий позволяют определить количество автомобилей и направление их движения достаточно точно. Матрица выигрышей для данного случая дорожной ситуации на перекрестке двух дорог  $R_1$  и  $R_2$  имеет вид:

$$\begin{array}{c}
 \text{Дорога 1} \\
 \left[ \begin{array}{cc}
 & \begin{array}{cc} \text{Дорога 2} & \\ & R_{11} & R_{12} \end{array} \\
 R_{21} & (1, 2) & \leftarrow (2, 1) \\
 & \downarrow & \downarrow \\
 R_{22} & (2, 1) & \leftarrow (3, 0)
 \end{array} \right. \quad (7)
 \end{array}$$

Очевидно, что решение может быть основано на чистых стратегиях. У рассматриваемой матрицы существует седловая точка (2, 1). При этом выигрыш (средняя задержка автомобилей) равен:

- 2,0 мин – для дороги  $R_1$ ;
- 1,0 мин – для дороги  $R_2$ .

По этим данным по формуле (4) можно вычислить длительность периода  $T$  в каждом из направлений и, соответственно, определить порядок работы «интеллектуальных» светофоров. Возможен и другой случай анализа распределения средних задержек движения транспорта на перекрестке, для которого распределение количества автомобилей указано в табл. 2.

**Таблица 2.** Распределение средних задержек движения транспорта на перекрестке по полосам  
**Table 2.** Distribution of average traffic delays at an intersection by lanes

Полоса движения / Lane	Движение / Movement	Средняя задержка движения, мин / Average traffic delay, min
$d_{11}^1$	Прямо	5,0
$d_{11}^2$	Прямо	2,0
$d_{12}^1$	Поворот направо	3,0
$d_{12}^2$	Поворот направо	3,0
$d_{22}^1$	Прямо	5,0
$d_{22}^2$	Прямо	1,0
$d_{21}^1$	Поворот направо	2,0
$d_{21}^2$	Поворот направо	3,0

Матрица выигрышей для данного случая дорожной ситуации на перекрестке двух дорог  $R_1$  и  $R_2$  имеет вид:

$$\begin{array}{c}
 \text{Дорога 2 (игрок 2)} \\
 \begin{array}{cc}
 & R_{11} & R_{12} \\
 \text{Дорога 1 (игрок 1)} & \begin{array}{c} R_{21} \\ R_{22} \end{array} & \begin{array}{c} (5, 2) \\ (3, 3) \end{array} & \begin{array}{c} \longrightarrow \\ \longleftarrow \end{array} & \begin{array}{c} (2, 3) \\ (5, 1) \end{array} \\
 & & & & \begin{array}{c} \downarrow \\ \uparrow \end{array}
 \end{array}
 \end{array} \quad (8)$$

Очевидно, что решения в чистых стратегиях для этой матрицы не существует. Найдём это решение в смешанных стратегиях. Чтобы гарантировать минимальное время средней задержки автомобилей (или достаточно близкое к этому значению) на дороге  $R_1$  (игрок 1) вне зависимости от задержки движения автомобилей на дороге  $R_2$  (игрок 2), сконцентрируем внимание на величине средней задержки автомобилей на дороге  $R_1$  и т. д. Рассчитаем смешанные стратегии, определенные для  $R_2$ .

В соответствии с терминологией теории игр, если игрок 2 выбирает первый столбец выигрышной матрицы с вероятностью  $q$ , а второй столбец – с вероятностью  $(1 - q)$ , то математическое ожидание для обеих строк выигрышной матрицы игрока 1 должно быть равно  $5q + 2(1 - q) = 3q + 5(1 - q)$ . Следовательно,  $q = 3/5$ ,  $(1 - q) = 2/5$ . Таким образом, игрок 1 должен выбрать первый столбец матрицы выигрышей с вероятностью  $3/5$ , а второй столбец – с вероятностью  $2/5$ . При этом ожидаемый выигрыш игрока 1 будет равен  $19/5$ . Как легко видеть, это значение ожидаемого выигрыша будет сохраняться при использовании игроком 1 любой смешанной стратегии  $(p, 1 - p)$ , поскольку:

$$5q \frac{3}{5} + 2q \frac{2}{5} + 3(1 - q) \frac{3}{5} + 5(1 - q) \frac{2}{5} = \frac{19}{5}.$$

Подобно тому, как игрок 1, желая добиться того, чтобы ожидаемый выигрыш игрока 2 не зависел от выбора им смешанной стратегии, с помощью матрицы выигрышей для игрока 2 получим  $2p + 3(1 - p) = 3p + 1(1 - p)$ . Следовательно,  $p = 2/3$ ,  $(1 - p) = 1/3$ . Тогда смешанная стратегия имеет вид

$$(s_1, s_2) = \left( \frac{2}{3} A_1 + \frac{1}{3} A_2 \right) + \left( \frac{3}{5} B_1 + \frac{2}{5} B_2 \right),$$

а равновесный выигрыш составит  $(A, B) = (19/5, 7/3)$ . При этом равновесный выигрыш (средняя задержка автомобилей по дорогам  $R_1$  и  $R_2$ ) равен:

- 3,8 мин – для дороги  $R_1$ ;
- 2,3 мин – для дороги  $R_2$ .

По этим данным по формуле (4) можно вычислить длительность периода  $T$  в каждом из направлений и, соответственно, определить порядок работы «интеллектуальных» светофоров.

### Заключение

1. Разработка новых технологий, позволяющих оптимизировать процесс вождения, является актуальной проблемой. Поэтому применение таких технологий, в том числе основанных на теории игр, которые позволят улучшить управление движением транспорта в режиме реального времени и контролировать пропускную способность на перекрестках, значительно повысит экологичность и безопасность городского транспорта.

2. Использование предложенной модели, основанной на применении теории игр, позволяет существенно сократить задержки транспортных средств и оптимизировать текущую ситуацию на перекрестке.

### Список литературы

1. Капский, Д. В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д. В. Капский. Минск: Белор. нац. техн. ун-т, 2008.
2. Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report / D. Gettman [et al.] // Publication FHWA-HRT-08-051. U.S.: Department of Transportation, 2008.
3. Власов, А. А. Управление насыщенными транспортными потоками в городах / А. А. Власов, Н. А. Орлов. Пенза: Пензен. гос. ун-т архит. и строит., 2014.
4. Климович, А. Н. Алгоритм управления перекрестком на основе V2I взаимодействия / А. Н. Климович, В. Н. Шуть // Системный анализ и прикладная информатика. 2018. № 4. С. 21–27.
5. Саати, Т. Л. Математические модели конфликтных ситуаций / Т. Л. Саати. М.: Сов. радио, 1977.

### References

1. Kapsky D. V. (2008) *Forecasting Accidents in Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University (in Russian).
2. Gettman D., Pu L., Sayed N., Shelby S. (2008) Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report. *Publication FHWA-HRT-08-051*. U.S., Department of Transportation.
3. Vlasov A. A., Orlov N. A. (2014) *Managing Heavy Traffic Flows in Cities*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction (in Russian).
4. Klimovich A. N., Shut V. N. (2018) Algorithm for Controlling an Intersection Based on V2I Interaction. *System Analysis and Applied Informatics*. (4), 21–27 (in Russian).
5. Saati T. L. (1977) *Mathematical Models of Conflict Situations*. Moscow, Sovetskoe Radio (in Russian).

### Сведения об авторе

Янкевич Н. С., канд. тех. наук, зав. отд., Центр системного анализа и стратегических исследований Национальной академии наук Беларуси

### Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Академическая, 1  
Центр системного анализа  
и стратегических исследований НАН Беларуси  
Тел.: + 375 17 378-92-65  
E-mail: lab\_12@tut.by  
Янкевич Наталья Степановна

### Information about the author

Yankevich N. S., Cand. of Sci., Head, of the Center for System Analysis and Strategic Research of the National Academy of Sciences of Belarus

### Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,  
Minsk, Akademicheskaya St., 1  
Center for System Analysis  
and Strategic Research of the NAS of Belarus  
Tel.: + 375 17 378-92-65  
E-mail: lab\_12@tut.by  
Yankevich Natallia Stepanovna