

21. Available at: <https://rg.ru/2019/03/19/posejdon-smogut-ispolzovat-dlia-glubinnogoissledovaniia-mirovogo-okeana.html> (accessed 14 July 2020).
22. Available at: <https://www.scmp.com/news/china/article/1580226/shanghai-san-francisco-100-minutes-chinese-supersonic-submarine>.
23. Mandel'shtam L.I. Lektsii po optike, teorii otositel'nosti i kvantovoy mekhanike [Lectures on optics, theory of relativity and quantum mechanics]. Moscow: Nauka, 1972, 440 p.
24. Wolfram S. Put' k fundamental'noy teorii fiziki [The Path to the Fundamental Theory of Physics]. Available at: <https://writings.stephenwolfram.com/2020/04/finally-we-may-have-a-path-to-the-fundamental-theory-of-physics-and-its-beautiful/> (accessed 18 August 2020).

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.А. Матвеев.

Курносков Андрей Алексеевич – АО «СПМБМ «Малахит», АО ОСК; e-mail: ajkur@mail.ru; 196135, Санкт-Петербург, ул. Фрунзе, 18; тел.: +78122421538; к.т.н.; зам. главного конструктора специализации.

Kurnosov Andrey Alexeevich – SPMDB "Malachite", USBC JSC; e-mail: ajkur@mail.ru; 18 Frunze str., Saint-Petersburg, 196135, Russia; phone: +78122421538; cand. of eng. sc.; deputy chief designer.

УДК 004.9:004.8

DOI 10.18522/2311-3103-2020-5-100-110

Д.М. Елькин, В.В. Вяткин

ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА МЭК 61499*

Количество транспортных средств на дорогах общего пользования постоянно увеличивается, а развитие дорожной инфраструктуры происходит низкими темпами, а не качественное управление транспортом влечет за собой повышение стоимости перевозок, увеличение аварийности, уровня шума, а также загрязнение окружающей среды. Вследствие этого, возникает необходимость применения передовых алгоритмов и подходов к управлению транспортом, чтобы максимально использовать существующую дорожную сеть и увеличить пропускную способность дорог. В ходе последних исследований выявлено, что на участках дорожной сети с высокой интенсивностью и изменчивостью трафика, наиболее эффективны адаптивные подходы к управлению дорожным движением. Суть применяемых на сегодняшний день подходов к адаптивному управлению заключается в том что, они основаны на анализе транспортной загруженности и изменяют фазы работы светофора в зависимости от полученных данных в режиме реального времени. Адаптивное управление транспортными потоками показывает намного более лучшие результаты по сравнению с жестким управлением, существенно уменьшает транспортные задержки, время в пути и выбросы вредных веществ в атмосферу, поэтому современные исследователи разрабатывают новые и усовершенствуют существующие подходы и алгоритмы адаптивного управления транспортом. Например, активно развиваются подходы к управлению трафиком, основанные на концепции IoT и использовании облачных вычислений. Так же разрабатываются концепции применения агентного подхода к адаптивному управлению. В работе предлагается способ управления транспортными потоками и автоматизации дорожной инфраструктуры с использованием агентного подхода. Предлагаемый подход включает распределенное управление различными элементами дорожной сети и их прямую взаимосвязь друг с другом. Для реализации этой концепции был использован открытый стандарт распределенных систем управления и автоматизации МЭК 61499, а для проверки возможности реализации использованы несколько моделей транспортных пересечений, одно из которых создано на основе реальных данных и SUMO - пакет микроскопического и непрерывного моделирования дорожного движения.

IoT; управление дорожным движением; интеллектуальные транспортные системы; ИТС; транспортные потоки; транспортные заторы.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90102.

D.M. Elkin, V.V. Vyatkin

APPROACH TO TRAFFIC MANAGEMENT BASED ON THE IEC 61499 STANDARD

The number of vehicles on public roads is constantly increasing, and the development of road infrastructure is proceeding at a slow pace, and not high-quality transport management entails an increase in transportation costs, an increase in accidents, noise levels, and environmental pollution. As a consequence, there is a need to apply advanced algorithms and approaches to transport management in order to maximize the use of the existing road network and increase road capacity. In the course of recent studies, it has been revealed that adaptive approaches to traffic management are most effective on sections of the road network with high traffic intensity and variability. The essence of the approaches to adaptive management used today is that they are based on the analysis of traffic congestion and change the phases of traffic light operation depending on the received data in real time .. Adaptive traffic management shows much better results compared to tight control, significantly reduces transport delays, travel time and emissions of harmful substances into the atmosphere, therefore, modern researchers are developing new and improving existing approaches and algorithms for adaptive transport control. For example, traffic management approaches based on the concept of IoT and the use of cloud computing are actively developing. The concepts of applying the agent-based approach to adaptive control are also being developed. The paper proposes a method for managing traffic flows and automating road infrastructure using an agent-based approach. The proposed approach includes distributed management of various elements of the road network and their direct interconnection with each other. To implement this concept, the open standard of distributed control and automation systems IEC 61499 was used, and to test the feasibility of implementation, several models of traffic intersections were used, one of which was created on the basis of real data and SUMO - a microscopic and continuous traffic simulation package.

IoT; traffic management; intelligent transportation system; ITS; traffic; traffic jam.

Введение. На сегодняшний день существует несколько различных подходов к управлению транспортными потоками в условиях высокой загруженности и для повышения безопасности дорожного движения. Например, для управления движением на перекрестках, наиболее часто применяется жесткое светофорное управление [1].

Чтобы увеличить эффективность такого управления, период сигналов светофора изменяют в зависимости от времени суток [2]. Так же, для увеличения пропускной способности дороги применяется подход «Зеленой волны», в этом подходе для различных перекрестков расположенных рядом рассчитывается фазовый сдвиг в работе светофоров [3]. Рассмотренные подходы эффективны, когда движение транспортных потоков предсказуемо и теряет свою эффективность, когда трафик резко изменяется [4]. На участках дорожной сети с высокой интенсивностью и изменчивостью трафика, наиболее эффективны адаптивные подходы к управлению движением [5–7]. Подходы к адаптивному управлению основаны на анализе транспортной загруженности и изменения фаз работы светофора в зависимости от неё. Адаптивное управление транспортными потоками показывает намного более лучшие результаты по сравнению с жестким управлением, существенно уменьшает транспортные задержки, время в пути и выбросы вредных веществ в атмосферу [8], поэтому современные исследователи разрабатывают новые и совершенствуют существующие подходы и алгоритмы адаптивного управления дорожным движением.

Например, активно развиваются подходы к адаптивному управлению трафиком, основанные на концепции IoT [9–11] и использовании облачных вычислений [12]. Так же разрабатываются концепции применения агентного подхода к адаптивному управлению [13–15]. Согласно проведенному обзору разрабатываемых решений по адаптивному управлению транспортом основные проблемы заключаются в сложности разработки и внедрения новых подходов для существующей дорожной инфраструктуры. Эти факторы увеличивают стоимость внедрения новых подходов, а также период от публикации предлагаемого подхода до тестирования и непосредственного применения.

Для решения обозначенных проблем предлагается подход к адаптивному управлению дорожным движением с помощью автоматизации дорожной инфраструктуры. Предлагаемый подход основан на управлении интеллектуальными устройствами на перекрестках и участках дорожной сети (светофоры, сенсоры, детекторы, знаки и т.д.). Все эти устройства являются элементами дорожной инфраструктуры и объединены каналами связи, образуя единую распределенную систему для управления транспортными потоками.

Для разработки и реализации предлагаемого подхода распределенной оптимизации использован открытый стандарт распределенных систем управления и автоматизации МЭК 61499 [16]. Работа в рамках стандарта МЭК 61499 позволяет быстро создать прототип системы для проверки работоспособности предлагаемого подхода, а также быстро внедрить разработку при наличии необходимых контроллеров, например в светофоре.

Далее в работе описана суть предлагаемого подхода к адаптивному управлению дорожным движением. Затем рассмотрена реализация разработанного подхода в среде имитационного моделирования и проверка его работы на имитационной модели участка дорожной сети. Затем в работе представлены сравнительные результаты управления транспортными потоками с использованием различных подходов к организации движения транспорта.

Подход к адаптивному управлению дорожным движением на основе взаимосвязанных интеллектуальных агентов. Подходы к управлению дорожным движением обычно, имеют централизованную структуру, которая характеризуется зависимостью объектов дорожной инфраструктуры от «Центра управления дорожным движением».

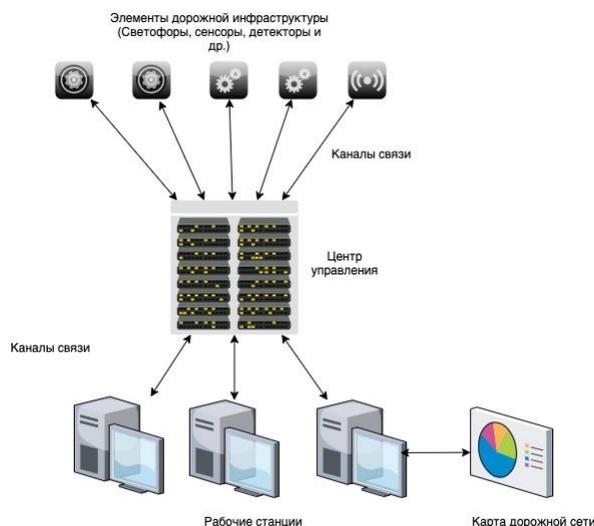


Рис. 1. Структура централизованной системы управления дорожным движением

Управляющие воздействия на транспортные потоки формируются в центре управления дорожным движением и данные о ситуации на дорожной сети так же обрабатываются централизованно. В результате система теряет гибкость и управляющие решения работают медленно. Однако, гибкость и скорость принятия решений важные свойства для управления динамическими средами.

Применение агентного подхода к управлению транспортными потоками позволяет сделать систему гибкой и интеллектуальной. Например, в работе [17] предлагается новая архитектура много-агентного подхода для управления движением на уча-

стке дорожной сети. Но существенным минусом предлагаемых решений является то, что нужно создавать новую инфраструктуру для реализации и разрабатывать специализированное оборудование, а этот процесс очень часто дорогой и долгий.

В то же время применение IoT устройств на базе современных микроконтроллеров [18, 19] позволяет частично решить проблему с оборудованием для новой дорожной инфраструктуры, но остаются острыми вопросы надежности такого оборудования и интеграции с существующими системами управления дорожным движением.

В связи с этим, предлагается концепция управления транспортными потоками с помощью взаимосвязанных интеллектуальных агентов. Каждый из агентов обладает полномочиями для применения управляющих воздействий на транспорт внутри перекрестка с помощью изменения циклов работы светофора или его отключения. Так же агенты передают данные о загруженности дорожной сети в зоне своей ответственности агентам управляющим соседними перекрестками для обеспечения более эффективного управления движением.

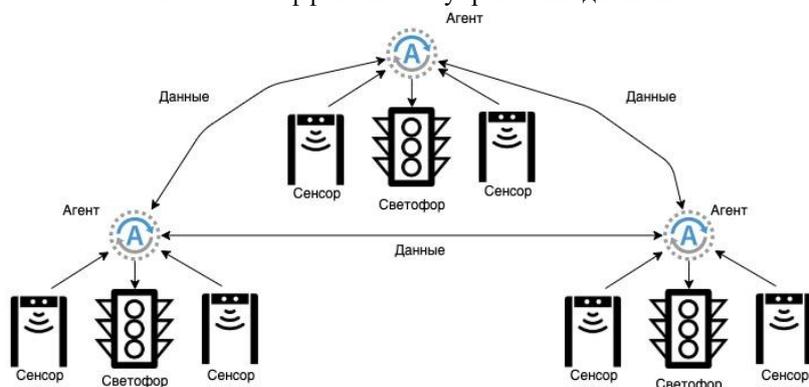


Рис. 2. Структура предлагаемого подхода

На данном этапе, рассматривается следующий принцип работы агента на перекрестке:

1. Получение данных с датчиков и сенсоров, расположенных на дорожной сети.
2. Анализ транспортной загруженности согласно логике, заложенной в агента.
3. Передача информации о загруженности соседним агентам.
4. Получение информации от соседних агентов.
5. Принятие решения о управляющем воздействии на участок дорожной сети.
6. Применение управляющего воздействия (изменение цвета сигнализации светофора).

Для проверки выдвигаемой гипотезы, была использована среда для работы с открытым стандартом по проектированию распределенных систем «NxtStudio» [20] и комплекс для проведения имитационного моделирования транспортных потоков SUMO [21].

Реализация концепции агентного управления. На данный момент в начале разработки концепции, предлагается реализация интеллектуального управления одним перекрестком на дорожной сети с помощью интеллектуального агента – регулятора логика работы которого заключается в следующем:

Регулятор, с помощью датчиков, установленных на дорожной сети, определяет количество автомобилей, движущихся по каждому направлению. Если количество автомобилей на дороге не превышает, допустимое значение для нерегулируемого перекрестка, агент не активен. Как только количество транспортных

средств превысило допустимое, регулировщик проверяет по какому направлению больше автомобилей движется и нужно начать их пропускать, анализируя каждую полосу движения. После определения, на выбранных полосах включается разрешающий сигнал светофора. Регулировщик постоянно фиксирует количество транспортных средств на каждой полосе, как только количество автомобилей по движущемуся направлению стало в половину меньше автомобилей ожидающих проезда, светофорная сигнализация изменяется на разрешающий сигнал для ожидающих автомобилей. Регулировщик работает пока количество транспорта на перекрестке не уменьшится до допустимого для отключения светофорной сигнализации.

Предложенную простую логику регулировщика при включении светофора для различных направлений на перекрестке, можно представить следующим образом:

$$\frac{100 * \sum_{l=1}^n l}{\sum_{r=1}^k r} > 50. \quad (1)$$

где n – общее количество полос для движения в движущемся направлении; l – количество полос в движущемся направлении; k – общее количество полос для движения в ожидающем направлении; r – количество полос в ожидающем направлении.

Агент регулировщик был реализован в виде функционального блока, выполненного по стандарту МЭК 61499.

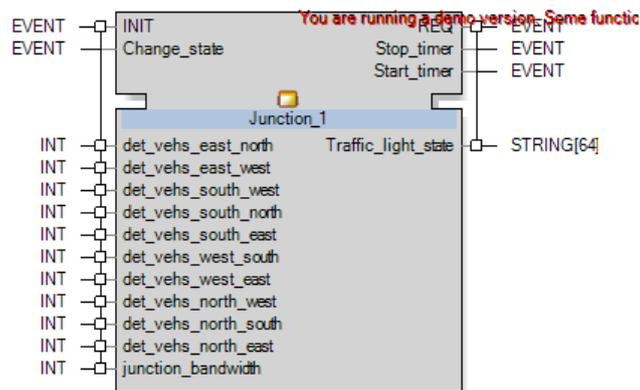


Рис. 3. Функциональный блок регулировщик

Входящее событие INIT – инициализирует работу функционального блока и позволяет считать данные о текущей загрузке перекрестка с транспортных детекторов, передающих данные на входные переменные: «det_vehs_east_north...det_vehs_north_east». Входная переменная «junction_bandwidth» определяет максимальную загрузку для перекрестка без светофорного регулирования.

Входящее событие «Change_state» – инициализирует изменение сброс светофорной сигнализации, когда количество автомобилей на перекрестке уменьшилось до допустимого.

Исходящее событие REQ – инициализирует выходную переменную «Traffic_light_state» в которой находится сформированный регулировщиком цикл работы светофора.

Исходящие события «Start_timer» и «Stop_timer» используются для контроля включения и выключения режима светофорного регулирования на перекрестке.

Логика работы регулировщика на перекрестке реализована в функциональном блоке с помощью ЕСС диаграммы и на языке программирования Structured text.

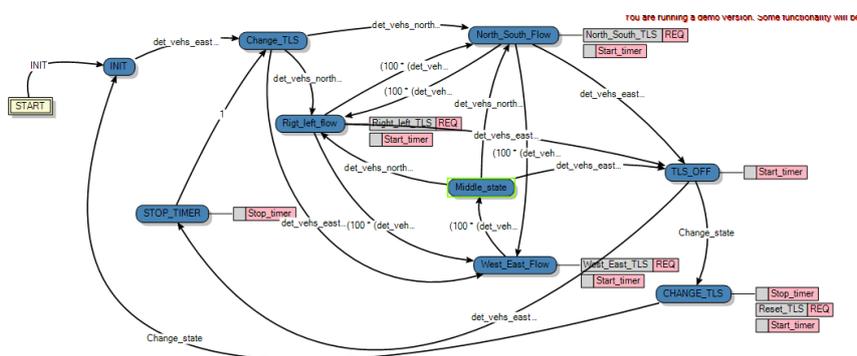


Рис. 4. ECC диаграмма

Для проверки гипотезы были созданы две модели х-образных перекрестков:

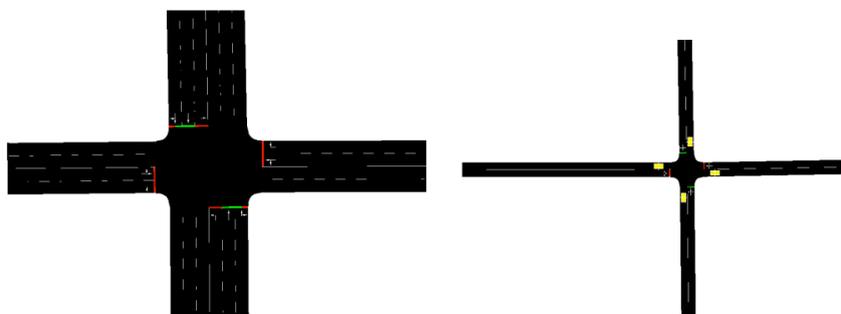


Рис. 5. Перекрестки А и В

Перекресток В создавался без учета реальных транспортных и геометрических характеристик для дорожной сети. Перекресток имеет по одной полосе движения в каждом направлении и случайный объем транспортных потоков и стандартный цикл работы светофора.

Перекресток А создан на основе данных о транспортных и геометрических характеристиках из специализированного пособия для транспортных инженеров [22]. На перекрестке расположены по 3 полосы для движения в каждом направлении с севера на юг и по 2 с запада на восток. Так же для него специализированно рассчитан цикл работы светофора исходя из транспортной загруженности.

Далее было разработано средство для коммуникации регуляровщика с имитационной моделью участка дорожной сети.

В стандарте по проектированию распределенных систем, для коммуникации между устройствами и внешней средой по протоколу TCP разработан функциональный блок NETIO. Который был использован для коммуникации разработанного регуляровщика со средой имитационного моделирования SUMO с использованием языка программирования Python и стандартного средства SUMO – TraCi. На языке Python был реализован асинхронный сервер для приема и обработки данных от функционального блока регуляровщика к имитационной модели перекрестка реализованной в SUMO.

После объединения компонентов в среду для тестирования, была проведена серия экспериментов по управлению движением на перекрестках А и В различными способами.

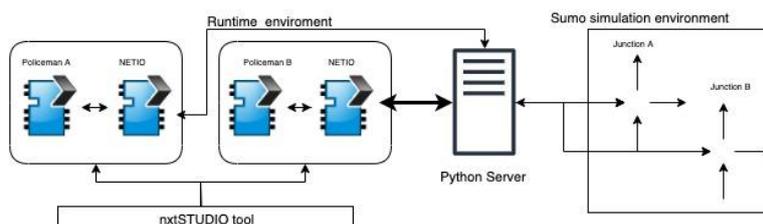


Рис. 6. Схема средства коммуникации

Серия экспериментов. Эксперименты по управлению движением были проведены на двух перекрестках А и В. В ходе экспериментов была запущена имитация длительностью 3600 секунд с тремя типами управления движением на перекрестке:

- 1) Управление агентом-регулирующим;
- 2) Жесткое управление с помощью светофорного цикла;
- 3) Без регулирования (свободный проезд).

Во время имитационного моделирования фиксировались следующие параметры:

Таблица 1

Параметры

Задержка перед отправлением	Секунды (симуляции)	Время ожидания для автомобилей перед стартом
Скорость прибытия	м/с	Скорость автомобилей, завершающих движение
Время ожидания	секунды	Время, в течение которого скорость автомобиля была менее 0.1 м/с
Потерянное время	секунды	Время, потерянное в сравнении с оптимальным временем движения
Количество автомобилей	штуки	Количество автомобилей, проехавших через перекресток

В результате проведенного имитационного моделирования были получены следующие результаты: Параметр «Задержка перед отправлением» при использовании агента-регулирующего примерно на 25 процентов ниже чем без регулирования движения на перекрестке и на 80 процентов ниже, чем при использовании жесткого цикла светофорного регулирования.

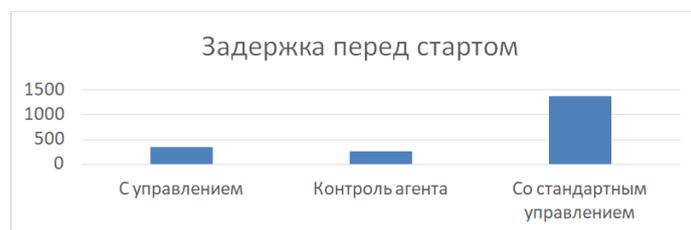


Рис. 7. Задержка перед стартом

Параметр «Скорость прибытия» для управления с помощью регулировщика и без какого-либо управления практически одинаковы. При использовании стандартного светофорного регулирования скорость больше.

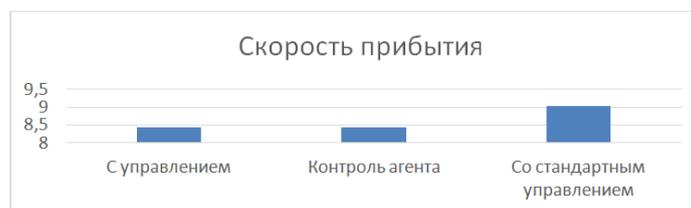


Рис. 8. Скорость прибытия

Самое минимальное время ожидания транспортных средств характерно для перекрестка без управления, но это актуально только в идеальных условиях моделирования, где не происходят ДТП. На регулируемом перекрестке управляющий агент снижает время ожидания на 14 процентов по сравнению с обычным светофорным циклом.



Рис. 9. Время ожидания

Параметр «Время ожидания» так же принимает наименьшее значение при управлении регулировщиком с преимуществом в 31 процент.

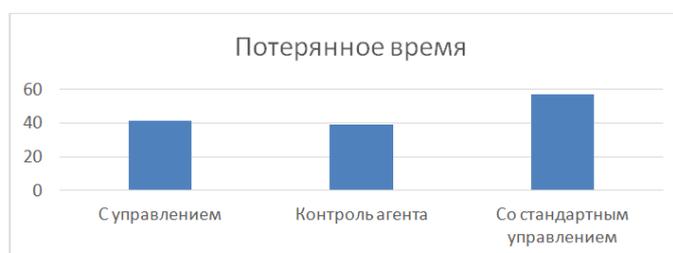


Рис. 10. Потерянное время

При агентном управлении пропускная способность перекрестка увеличивается на 25 процентов по сравнению со стандартным управлением движением.

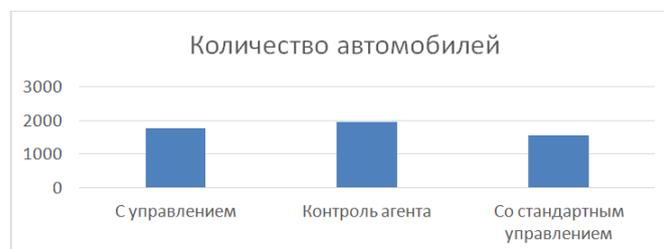


Рис. 11. Количество автомобилей

На перекрестке А, также была проведена серия имитаций с мониторингом по аналогичным параметрам.



Рис. 12. Задержка перед стартом

В этом случае параметр «Задержка перед стартом» без светофорного регулирования значительно ниже, чем на регулируемом перекрестке, но у агентного подхода так же остается преимущество в 19 процентов.

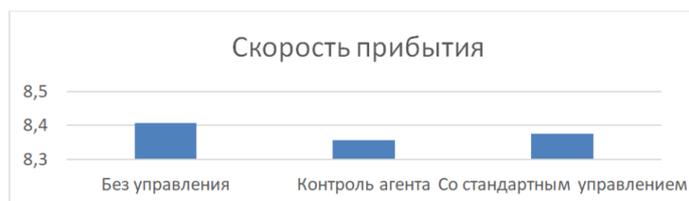


Рис. 13. Скорость прибытия

Конечная скорость транспортных средств, также, как и на предыдущем перекрестке, остается примерно одинаковой.

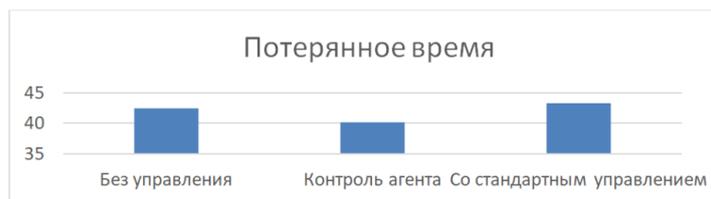


Рис. 14. Потерянное время

Как можно увидеть, на более сложном перекрестке, агент-регулировщик обеспечивает наименьшие потери времени для транспортных средств, на 7 % по сравнению со стандартным светофорным регулированием.



Рис. 15. Время ожидания

Время ожидания при проезде пересечения, которое управляется регулировщиком на 22 процента ниже, чем на перекрестке без регулирования, и на 13 процентов ниже, чем на перекрестке с жестким светофорным циклом.



Рис. 16. Количество автомобилей

И как следствие, пропускная способность перекрестка, управляемого агентом-регулирующим выше на 10 процентов чем с обычным светофором и на 20 % выше, чем без светофора, так как без светофора на данном типе пересечения возник большой затор со стороны второстепенной дороги.

Заключение. В работе был описан подход к управлению движением на различных перекрестках, основанный на простой логике регулировщика, который переключает сигналы светофора в зависимости от загруженности направлений движения.

В результате проведенного экспериментального исследования были выявлены очевидные преимущества адаптивного управления пересечением с помощью интеллектуального регулировщика, в сравнении с классическим светофорным регулированием, а также отсутствием управления на перекрестке. По большинству исследуемых параметров, управление с помощью агента превосходит конкурентные типы управления, а по некоторым в несколько раз. При этом, для реализации агента, был использован открытый стандарт МЭК 61499 и среда NXTStudio, что позволяет быстро создать прототип разработанного решения для поддерживаемого контроллера и внедрить его на экспериментальный участок дорожной сети. Такой подход позволяет с высокой скоростью переходить от этапа идеи и исследовательской работы к этапу реализации на реальном оборудовании. Это повышает экономическую и практическую эффективность проводимых исследований.

В развитие концепции управления транспортными потоками с помощью взаимосвязанных интеллектуальных агентов, дальнейшие исследования будут направлены на реализацию управления движением одновременно на нескольких перекрестках, агенты на которых, будут влиять на принятие решения о воздействии на транспортный поток обмениваясь данными о загруженности подконтрольной дорожной сети друг с другом.

Так же в будущих работах будет рассмотрен подход к управлению движением, где на каждом перекрестке работает множество агентов, которые коллективно принимают решение при формировании следующей фазы движения транспортных средств. Решение агентов основано на загруженности подконтрольной полосы и влиянии принятого решения на транспортную ситуацию в целом и мнения соседних агентов о необходимых фазах движения автомобилей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Roess R.P., Prassas E.S., McShane W.R. Traffic engineering. Pearson/Prentice Hall, 2004.
2. Heung, Tsin Hing, Tin Kin Ho, and Yu Fai Fung. Coordinated road-junction traffic control by dynamic programming, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2005, 6.3, pp. 341-350.
3. Nagatani Takashi. Vehicular traffic through a sequence of green-wave lights, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, 380, pp. 503-511.

4. *Gershenson Carlos, and David A. Rosenblueth*. Self-organizing traffic lights at multiple-street intersections, *Complexity*, 2012, 17.4, pp. 23-39.
5. *Smith Stephen F., et al*. Smart urban signal networks: Initial application of the surtrac adaptive traffic signal control system, *Twenty-Third International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 2013.
6. *Hunter Michael P., et al*. A probe-vehicle-based evaluation of adaptive traffic signal control, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13.2, pp. 704-713.
7. *Pandit Kartik, et al*. Adaptive traffic signal control with vehicular ad hoc networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, Vol. 62.4, pp. 1459-1471.
8. *Tielert Tessa, et al*. The impact of traffic-light-to-vehicle communication on fuel consumption and emissions, *2010 Internet of Things (IOT). IEEE, 2010*.
9. *Khanna Abhirup, and Rishi Anand*. IoT based smart parking system, *2016 International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA). IEEE, 2016*.
10. *Bui Khac-Hoai Nam, Jai E. Jung, and David Camacho*. Game theoretic approach on Real-time decision making for IoT-based traffic light control, *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2017, 29.11, e4077.
11. *Phan, Cao Tho, et al*. Applying the IoT platform and green wave theory to control intelligent traffic lights system for urban areas in Vietnam, *THIS*, 2019, 13.1, pp. 34-51.
12. *He Wu, Gongjun Yan, and Li Da Xu*. Developing vehicular data cloud services in the IoT environment, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10.2, pp. 1587-1595.
13. *Mzahm Anas M., Mohd Sharifuddin Ahmad, and Alicia YC Tang*. Agents of Things (AoT): An intelligent operational concept of the Internet of Things (IoT), *2013 13th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. IEEE, 2013*.
14. *Liu Ying, Lei Liu, and Wei-Peng Chen*. Intelligent traffic light control using distributed multi-agent Q learning, *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2017*.
15. *Bui Khac-Hoai Nam, and Jason J. Jung*. Internet of agents framework for connected vehicles: A case study on distributed traffic control system, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2018, pp. 116 89-95.
16. IEC61499-1, Function Blocks - Part 1 Architecture, International Electrotechnical Commission, Geneva, International standard, 2005.
17. *Kaminski Nicholas J., Maria Murphy, and Nicola Marchetti*. Agent-based modeling of an IoT network, *2016 IEEE international symposium on systems engineering (ISSE). IEEE, 2016*.
18. *Misbahuddin Syed, et al*. IoT based dynamic road traffic management for smart cities, *2015 12th International Conference on High-capacity Optical Networks and Enabling/Emerging Technologies (HONET). IEEE, 2015*.
19. *Chong Hon Fong, and Danny Wee Kiat Ng*. Development of IoT device for traffic management system, *2016 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd). IEEE, 2016*.
20. The tool for engineering of distributed systems [Online]. Available: <https://www.nxtcontrol.com/en/engineering/>.
21. The vehicular traffic simulator. [Online]. Available: <http://sumo.sourceforge.net/>.
22. *Stolyarov V., et al*. Guidelines to practical work and diploma design for students of the specialty 190700, *Substantiation of duration of the lighting cycle. 2012*.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Б. Чернышев.

Елькин Дмитрий Максимович – Южный федеральный университет; e-mail: delkin@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +78634360839; кафедра синергетики и процессов управления; аспирант.

Вяткин Валерий Владимирович – e-mail: vvyatkin@sfedu.ru; Институт компьютерных технологий и информационной безопасности; профессор.

Elkin Dmitriy Maksimovich – Southern Federal University; e-mail: delkin@sfedu.ru; 2, Chehova street, Taganrog, 347928, Russia, phone: +78634360839; the department of synergetics and management processes; postgraduate student.

Vyatkin Valeriy Vladimirovich – e-mail: vvyatkin@sfedu.ru; the Institute of computer technologies and information security; professor.