

Д. М. Елькин [D. M. Elkin]

УДК 004.9:004.8
DOI: 10.37493/2307-910X.2022.2.4

**ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМЫ
АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА
ОСНОВЕ СОБЫТИЙНО СВЯЗАННЫХ
АВТОМАТНЫХ МОДЕЛЕЙ**

**VERIFICATION OF THE EFFICIENCY OF A
DISTRIBUTED SYSTEM FOR ADAPTIVE
TRAFFIC FLOW CONTROL BASED ON
EVENT-COUPLED AUTOMATIC MODELS**

*ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Институт компьютерных технологий и ин-
формационной безопасности, г. Таганрог, Россия,
Southern Federal University, Taganrog, Russia, e-mail: delkin@sfnedu.ru*

Аннотация

В работе описан процесс создания тестовой среды и тестирования распределенной системы адаптивного управления транспортными потоками. Разработана программная система, осуществляющая связь системы управления с имитационной моделью и программы, реализующей работу системы управления. Основным содержанием работы является описание экспериментов, проведенных с целью проверки эффективности предложенного метода для разработки распределенных систем адаптивного управления транспортными потоками. Приведено сравнение разработанной системы с существующими системами адаптивного управления транспортными потоками.

Ключевые слова: управление дорожным движением, адаптивное управление, распределённая система управления, трафик, МЭК 61499, plug and play.

Abstract

The paper describes the process of creating a test environment and testing a distributed system for adaptive traffic control. A software system has been developed that communicates the control system with a simulation model and a program that implements the operation of the control system. The main content of the work is the description of experiments carried out to test the effectiveness of the proposed method for the development of distributed systems for adaptive traffic control. The developed system is compared with existing systems for adaptive traffic control.

Key words: traffic control, adaptive control, distributed control system, traffic, IEC 61499, plug and play.

Введение

Системы управления дорожным движением обычно проектируются на основе централизованной архитектуры [1-3]. Основными недостатками такого подхода являются зависимость всей системы от «Центра управления дорожным движением» который отделен от точки принятия решения, что влияет на качество решения и увеличивает количество возможных неисправностей.

Для того чтобы исключить недостатки, которые присущи системам с централизованным управлением применяются распределённые системы показавшие высокую эффективность в задачах управления дорожным движением [4-6],

В свою очередь для качественного проектирования распределенных систем управления используется международный стандарт МЭК 61499[7-9], который обеспечивает совместимость и взаимозаменяемость между собой всех устройств и элементов, входящих в систему. Он использует три уровня иерархии моделей при разработке распределенных систем: модель системы, модель физических устройств и модель функциональных блоков. Модели всех уровней в соответствии со стандартом представляются в виде функциональных блоков, которые описывают процесс передачи и обработки информации в системе.

Особенностью функциональных блоков стандарта МЭК 61499 является то, что они учитывают не только традиционное инициирование выполнения алгоритма с помощью тактирования или временного расписания, но и по признаку наступления некоторых событий (событийное управление). Событийное управление является более общим, а тактирование можно рассматривать как его частный случай, заключающийся в периодическом появлении одного и того же события (сигнала тактирования).

Метод [10] лежащий в основе системы для управления основан на активном взаимодействии агентов – субъектов управления, для реализации общей стратегии управления и применения управляющих воздействий к объектам управления, схема управления представлена на рисунке 1. Физически, агенты выполнены в виде элементов дорожной инфраструктуры - светофоры, дорожные знаки, либо являются их частью. Взаимодействие и применение управляющих воздействий основано на алгоритмах, предложенных авторами, но структура метода позволяет применять и другие алгоритмы, которые могут быть разработаны научным сообществом.

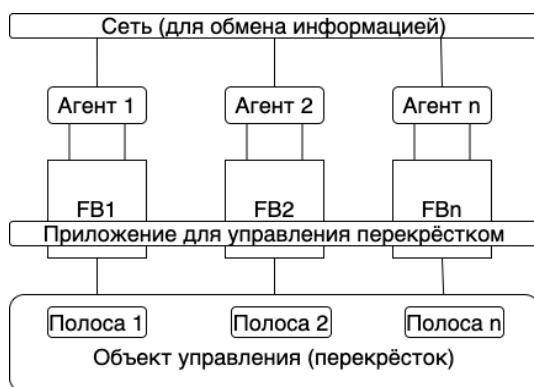


Рисунок 1. «Схема управления»/ Fig. 2. "Control Scheme"

Каждый агент для управления транспортными потоками и элементы его структуры (модули) могут быть представлены в виде событийно связанных автоматных моделей разработанных по стандарту МЭК 61499 в виде функциональных блоков (FB).

Разработанная на основе стандарта МЭК 61499 система управления транспортом [11] может быть применена для любых типов перекрёстков и участков дорожной сети вне зависимости от геометрических и транспортных характеристик.

Для проверки эффективности работы метода и системы управления было разработано программное обеспечение, реализующее работу метода, а также созданы тестовая среда, состоящая из макета участка дорожной сети, который включает четыре перекрёстка, и программное обеспечение, реализующее связь макета с системой управления.

Программное обеспечение, реализующее работу метода

Для реализации разработанного в работе метода и получения списка взаимосвязанных агентов в рамках перекрёстка и/или участка улично-дорожной сети, было разработано программное обеспечение [12] на языках программирования Java и C++.

Пользователь загружает в программу схему участка дорожной сети (рисунок 2), для которого необходимо создать систему управления транспортными потоками.

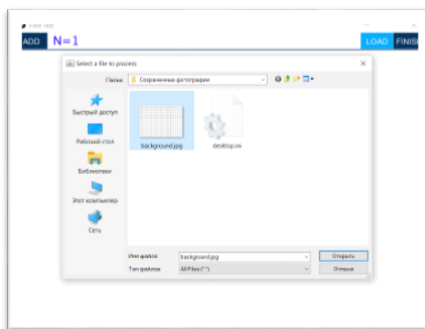


Рисунок 2. "Добавление схемы участка улично-дорожной сети"/ Fig. 2. "Adding a diagram of a section of the road network"

В соответствии со схемой организации дорожного движения для исследуемого участка улично-дорожной сети, на каждую полосу для въезда транспорта на перекрёсток и в места расположения дорожных знаков добавляется агент (рисунок 3) и при необходимости указываются направления движения транспорта, которые контролируются агентом.

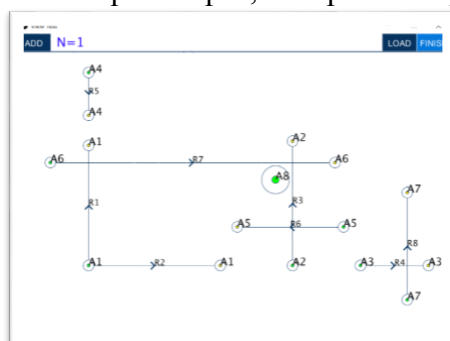


Рисунок 3. " Пример размещения агентов "/ Fig. 3. " Example of placing agents"

В результате работы программы пользователь получает наборы взаимосвязанных агентов для дальнейшего проектирования системы (рисунок 5). Наборы агентов разделены на категории в зависимости от типа пересечения траекторий движения транспорта. On Trajectory – пересечение агентов дорожной сети, транспортные потоки которых находятся на одной траектории движения. Factical crossing – пересечение агентов дорожной сети, транспортные потоки которых пересекаются. Agent-Road crossing – взаимодействие агентов дорожной сети и агентов перекрёстка.

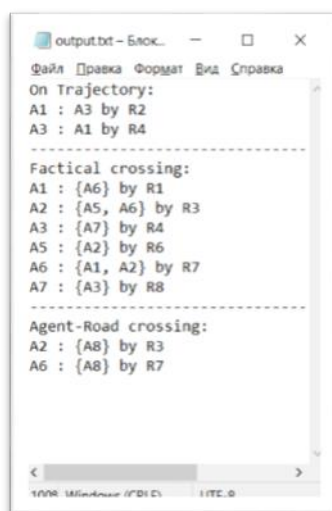


Рисунок 4. "Выходные данные работы программы"/ Fig. 4. "Program output"

Схема участка дорожной сети, исследуемого в работе, была загружена в разработанную программу. Затем было произведено размещение агентов с указанием установленных траекторий движения транспортных потоков (рисунок 5).

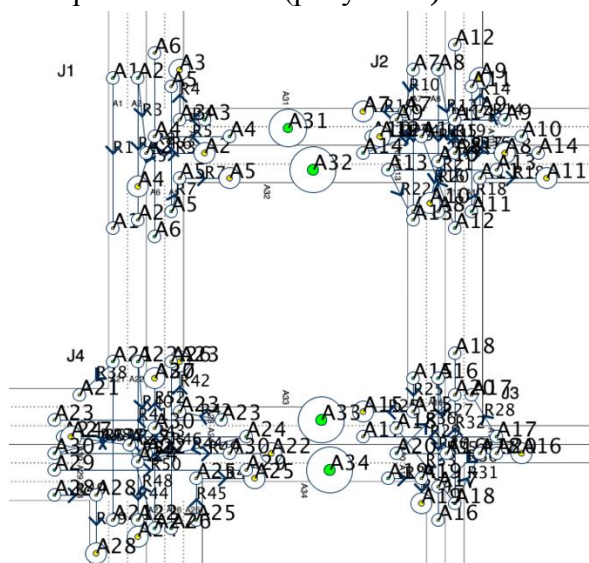


Рисунок 5. "Размещение агентов на исследуемом участке УДС"/ Fig. 5. "Placement of agents on the studied area of the UDS"

В результате работы программы для исследуемого участка дорожной сети были получены наборы взаимосвязанных агентов, которые используются для проектирования системы управления транспортными потоками.

Макет исследуемого участка дорожной сети

Для проведения тестирования системы, которая была разработана с помощью предлагаемого метода, был разработан макет участка улично-дорожной сети в масштабе 1:400 (рисунок 6). Макет состоит из четырёх отдельных перекрёстков, которые могут быть соединены по одной или по двум сторонам с другим транспортным пересечением.

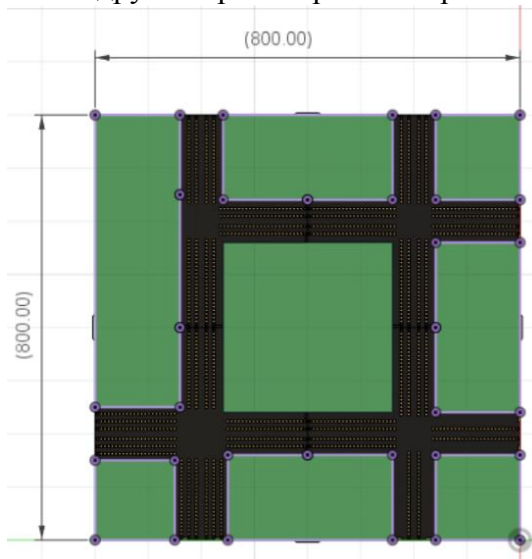


Рисунок 6. "Изображение макета"/ Fig 6. "Layout Image"

Перекрёсток J1 – Т-образный перекрёсток, содержащий по две полосы для движения на каждом из направлений.

Перекрёсток J2 – является крестообразным, так же, как и перекрёсток J1 содержит по две полосы для движения в каждом из направлений.

Перекрёсток J3 – крестообразный, в западном и южном направлениях содержит по три полосы для движения транспорта, а в северном и восточном по две полосы для движения в каждом из направлений.

Перекрёсток J4 – крестообразный в западном и северном направлениях содержит по две полосы для движения транспорта, а в южном и восточном по одной полосе для движения транспорта в каждом из направлений.

Все перекрёстки характеризуются высокой интенсивностью движения транспорта и транспортной загруженностью, в идеальных условиях моделирования без внешних управляющих воздействий на дорожную сеть, пропускная способность участка дорожной сети составляет 14 000 ед./ч.

Для визуализации автомобилей и их движения была использована светодиодная лента с адресными светодиодами WS2812b с плотностью 144 светодиода на метр (рисунок 7). В масштабах макета один светодиод равен одному автомобилю длиной 3 метра.

Для формирования транспортных потоков на макете, был использован микрокомпьютер Raspberry PI 3B и программа на языке программирования Python.

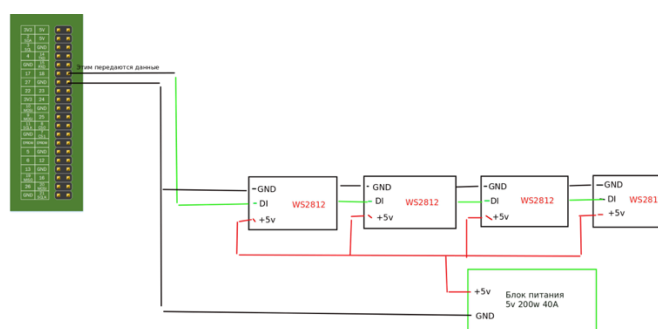


Рисунок 7. "Схема подключения аппаратной части"/ Fig. 7. "Hardware Connection Diagram"

При старте работы программа просчитывает возможные маршруты транспорта из одной точки макета участка улично-дорожной сети в другую. Затем начинается движение автомобилей на макете, с учётом разгона и торможения, поддержания скоростного режима в зависимости от трафика и управляющих воздействий, применяемых к транспортным пересечениям.

Распределённая система управления транспортными потоками

В результате работы программы, реализующей работу предлагаемого метода, для исследуемого участка УДС были получены конфигурация, состоящая из 34 агентов:

- Агенты перекрёстка в сети связанные с агентами УДС – 20;
- Агенты перекрёстка в сети – 10;
- Агенты УДС, связанные с агентами перекрёстка – 4.

Сборка системы управления транспортными потоками происходит из набора готовых функциональных блоков, разработанных в третьей главе по стандарту МЭК 61499. С помощью программного обеспечения NXTstudio разработана система управления транспортом в виде приложения, для дальнейшего размещения на контроллерах.

На первом шаге производим выбор необходимых элементов системы из блоков, согласно полученной конфигурации – двадцать агентов перекрёстка в сети, связанных с агентами УДС, десять агентов перекрёстка в сети, четыре агента улично-дорожной сети которые связаны с агентами перекрёстка (рисунок 8).

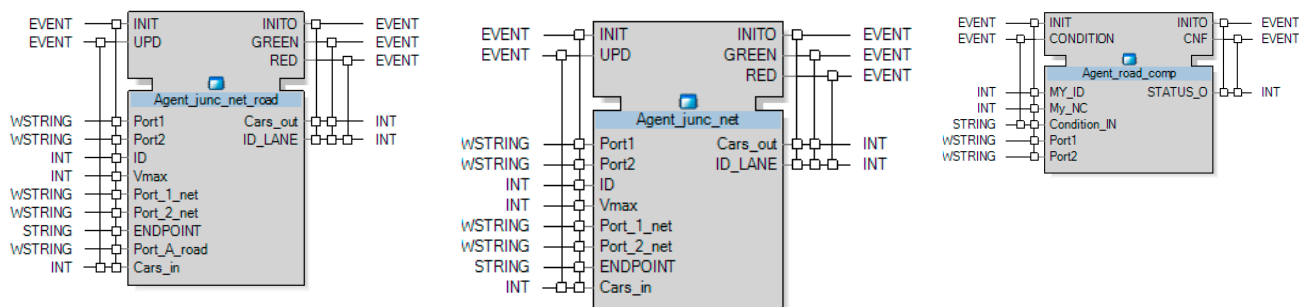


Рисунок 8. "Элементы системы для управления транспортом"/ Fig. 8. "Elements of the system for transport management"

На втором шаге производим настройку каждого агента (рисунок 9). Задаём необходимые порты для обмена данными между агентами, коммуникация происходит по протоколу TCP/IP, указываем ID агента согласно существующей конфигурации, указываем максимальное количество транспортных средств для подконтрольного агенту участка дорожной сети, порт для обмена данными с приложением IoT.

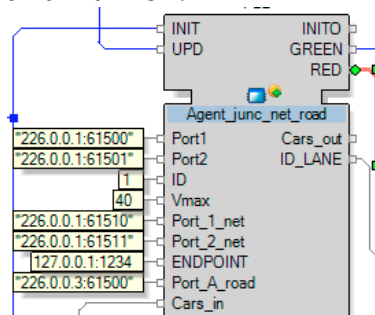


Рисунок 9. "Настройка агента"/ Fig. 9. "Agent setup"

В предлагаемой модели агент получает транспортную информацию и применяет управляющие воздействия, взаимодействуя с макетом участка дорожной сети, поэтому подключаем агента к функциональному блоку для связи с макетом (рисунок 10).

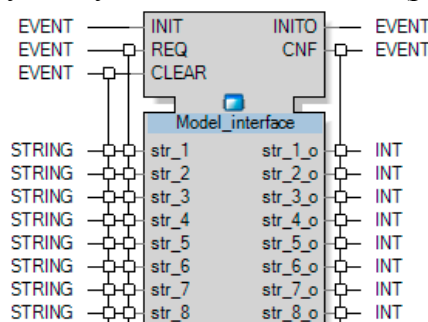


Рисунок 10. "Функциональный блок для связи с макетом"/ Fig. 10. "Function block for communication with the layout"

Функциональный блок «Model_interface» передаёт агентам информацию о количестве транспортных средств, находящихся в данный момент на подконтрольном участке дорожной сети, и получает управляющие воздействия от системы для применения их к транспортному потоку. При сценарии реального использования системы в качестве источника информации о количестве транспортных средств могут быть использованы транспортные детекторы или камеры, а в качестве источника вывода информации об управляющих воздействиях могут быть использованы светофоры или знаки переменной информации.

После добавления всех необходимых агентов для управления и их настройки, необходимо распределить элементы системы на виртуальные контроллеры, которые симулируют работу аппаратных устройств различных типов. Для запуска работы системы необходимо запустить работу виртуальных контроллеров «Software_PLС».

Тестирование распределённой системы управления транспортными потоками

Для тестирования распределенной системы адаптивного управления транспортными потоками была создана тестовая среда (рисунок 11), которая состоит из:

- Приложения в программном обеспечении NXTstudio;
- Сервера на языке программирования Python;
- Макета участка улично-дорожной сети из четырёх перекрёстков.



Рисунок 11. "Схема работы тестового стенда"/ Fig. 11. "The scheme of traffic at the intersection J2"

Система управления дорожным движением которая представлена в виде приложения и получает информацию о транспортной загруженности подконтрольного участка улично-дорожной сети от макета участка дорожной сети по протоколу TCP/IP с помощью сервера на Python в виде массива данных: $\langle n_1/n_2/\dots \rangle$ где n – количество автомобилей на полосе.

Затем агенты обрабатывают полученные данные и формируют управляющие воздействия на транспортный поток, которые передаются на макет участка дорожной сети с помощью Python сервера в виде массива данных:

$\langle A_{n1}:c/A_{n2}:c/\dots \rangle$ где A_n – номер агента, c – цвет сигнала светофора для полосы подконтрольной агенту.

Для оценки эффективности разработанной системы была проведена серия тестовых испытаний.

Для транспортного пересечения J2 на участке дорожной сети (рисунок 12) и для участка дорожной сети в целом было проведено по пять испытаний с различными типами организации движения транспорта через перекрёсток, а именно: без управления (движение по знакам приоритета), с жестким управлением, с адаптивным управлением на основе разработанной системы. Длительность каждого из тестовых испытаний составляла 3600 секунд.

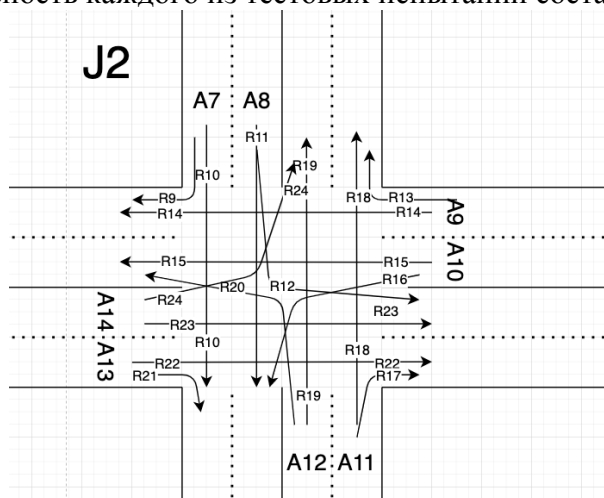


Рисунок 12. "Схема движения транспорта на пересечении J2"/ Fig. 12. "The scheme of traffic at the intersection J2"

Для тестовых испытаний без управления (движение по знакам приоритета) использовалась схема организации движения, где приоритет – знак главной дороги, отдавался направлениям с наибольшей загруженностью транспортом.

Для тестовых испытаний с жестким управлением расчет светофорных циклов для транспортных пересечений производился на основе методических рекомендаций по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах [13].

Результаты сравнения разработанной на основе предлагаемого метода системы адаптивного многоагентного управления и режимов формирования управляющих воздействий на перекресток - «без управления» и «жесткое управление», можно представить в виде таблицы 1.

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод что на тестовом стенде исследуемого участка улично-дорожной сети, применение системы с адаптивным многоагентным управлением, даёт лучшие результаты чем режимы «без управления» и «жесткое управление».

Для перекрёстка J2 по пропускной способности на 15 процентов в сравнении с «жестким управлением», на 27 процентов в сравнении с режимом «без управления» и по сумме задержек транспорта на 59 процентов в сравнении с режимом «без управления» и на 44 процента в сравнении с «жестким управлением». Для всего участка дорожной сети на 15 процентов в сравнении с «жестким управлением», на 10 процентов в сравнении с режимом «без управления» и по сумме задержек транспорта на 38 процентов в сравнении с режимом «без управления» и на 49 процентов в сравнении с «жестким управлением».

Таблица 1 - Сравнение эффективности управления на тестовом стенде/ Table 1. Comparison of control efficiency on a test bench

	Без управления	Жесткое управление	Адаптивное многоагентное управление
Перекрёсток J2	2159 авт./ч. 1379 с.	2508 авт./ч. 1020 с.	2939 авт./ч. 577 с.
Участок дорожной сети	10654 авт./ч. 3185 с.	10021 авт./ч. 3851 с.	11788 авт./ч. 1991 с.

Для полного участка дорожной сети на 15 процентов в сравнении с «жестким управлением», на 10 процентов в сравнении с режимом «без управления» и по сумме задержек транспорта на 38 процентов в сравнении с режимом «без управления» и на 49 процентов в сравнении с «жестким управлением».

Заключение

Результаты, полученные в ходе тестирования работоспособности системы адаптивного многоагентного управления, можно сравнить с результатами, которые демонстрируют существующие системы управления движением, рассмотренные в первой главе. Эффективность управления транспортом для представленных систем сравнивалась с существующим на участке дорожной сети управлением с помощью фиксированного светофорного цикла – «жестким управлением».

В работе [14] тестировалась эффективность применения системы ОПАС к участку дорожной сети, состоящему из 15 перекрёстков, соединенных одной центральной дорогой. Влияние системы оценивалось изолированно для каждого транспортного пересечения, при транспортной нагрузке около 2300 авт./ч. в часы пик и 900 авт./ч., для каждого пересечения при стандартной загруженности.

Анализ полученных в ходе тестирования данных показывает значительное сокращение на 39,7 процента задержек для транспортных средств, движущихся по главной дороге в южном направлении, не влияя на пропускную способность проезда транспортных средств, движущихся по второстепенной дороге.

В то же время общее снижение задержки для транспорта на всём исследуемом участке улично-дорожной сети при применении системы управления ОПАС составило 21,2 процента.

В исследовании [15] анализировалось влияние системы управления транспортными потоками SCATS на 3 участка дорожной сети которые располагаются в различных частях города и включают 6 транспортных пересечений, транспортная нагрузка на которые составляет 3 300 авт./ч., 3500 авт./ч. и 8 000 авт./ч.

В ходе исследования участка дорожной сети рассматривалось три периода движения транспортных средств: утренний час-пик, вечерний час пик и нормальное движение. Результаты показали, что применение системы управления SCATS позволяет сократить задержки транспорта на исследуемом участке дорожной сети в утренний час пик от 6.3 до 15.1 процента, в вечерний час-пик от 10.9 до 16.3 процентов, при нормальном движении от 8.2 до 18.5 процентов.

Эффективность системы управления движением SCOOT, рассматривалась в работе [16]. Было исследовано влияние системы на имитационную модель двух изолированных перекрёстков, магистраль, которая соединяет 5 перекрёстков и участок дорожной сети, состоящий из четырёх перекрёстков. Транспортная нагрузка на исследуемые участки дорожной сети составляла около 3000–3500 авт./ч., в зависимости от периода тестирования, вечер, утро или день.

Применение системы SCOOT на изолированных транспортных пересечениях позволило в одном случае, сократить количество задержек на 18 процентов, а в другом случае увеличило задержку, более чем в два раза. Для магистрали применение системы позволило сократить задержки от 12 до 51 процента, и в одном случае, увеличило задержку на 88 процентов. Для участка дорожной сети применение системы SCOOT увеличило задержку транспортных средств в среднем на в два раза.

Влияние на транспортный поток систем управления движением UTOPIA и ImFlow было рассмотрено в работе [17] на модели участка дорожной сети, состоящей из пяти перекрёстков. Транспортная нагрузка составляла 700–900 авт./ч., оценивались только периоды суток с максимальной транспортной нагрузкой.

При применении систем количество задержек транспорта было как положительным, так и отрицательным. При повышенной нагрузке на транспортную сеть возникла локальная перегрузка, что привело к дополнительной задержке автомобилей. Обе системы справились с этой ситуацией, при этом сценарии задержка уменьшилась на 2 процента при применении UTOPIA и на 8 процентов при применении ImFlow. В остальные периоды задержка транспорта увеличивалась от 0% до 23% при применении UTOPIA и от 5% до 37% с ImFlow.

Общее сравнение систем управления транспортом представлено в таблице 2, рассмотрены только положительные изменения.

Таблица 2. Сравнение систем управления транспортными потоками/ Table 2. Comparison of traffic management systems

АСУДД	Задержки
SCOOT	от –12% до -51%
SCATS	от –6.3% до – 12.5%
OPAC	от –21.2% до – 39.7
UTOPIA	~ –2%
IMFLOW	~ –8%
Распределённая система	от -27% до - 49%

В ходе тестирования выявлено что предлагаемая система управления позволяет сократить транспортные задержки на 27–49 процентов, что сопоставимо или лучше результатов которые показывают существующие системы управления транспортными потоками.

ЛИТЕРАТУРА

1. De Souza, Allan M., et al. "Traffic management systems: A classification, review, challenges, and future perspectives." *International Journal of Distributed Sensor Networks* 13.4 (2017): 1550147716683612.
2. Slavin, Courtney, et al. "Statistical study of the impact of adaptive traffic signal control on traffic and transit performance." *Transportation Research Record* 2356.1 (2013): 117-126.
3. An, Sheng-hai, Byung-Hyug Lee, and Dong-Ryeol Shin. "A survey of intelligent transportation systems." 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. IEEE, 2011.
4. 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.
5. 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* 116 (2018): 89-95.
6. De Souza AM and Villas L. A fully-distributed traffic management system to improve the overall traffic efficiency. In: 2016 ACM international conference on modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, Malta, 13-17 November 2016. New York: ACM.
7. Vyatkin V. IEC 61499 as enabler of distributed and intelligent automation: State-of-the-art review //IEEE transactions on Industrial Informatics. – 2011. – Т. 7. – №. 4. – С. 768-781.
8. Thramboulidis K. IEC 61499 in factory automation //Advances in Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering. – 2007. – С. 115-124.
9. Lyu, Guolin, and Robert William Brennan. "Towards IEC 61499-Based Distributed Intelligent Automation: A Literature Review." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17.4 (2020): 2295-2306.
10. Elkin D., Vyatkin V. (2021) Distributed Traffic Control Method Based on Interconnected Agents. In: Silhavy R. (eds) Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. CSOC 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 228. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77448-6_53
11. Lopez P. A. et al. Microscopic traffic simulation using sumo //2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). – IEEE, 2018. – С. 2575-2582
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611874 Российская Федерация. Программное обеспечение для подсчёта количества агентов для управления транспортными потоками на участке дорожной сети : № 2022610650 : заявл. 13.01.2022 : опубл. 02.02.2022 / Д. М. Елькин. – EDN РУРАКИ.
13. ОДМ 218.6.003–2011 Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах
14. Andrews, C. M. Evaluation of New Jersey route 18 OPAC/MIST traffic-control system/ C. M. Andrews, S. M. Elahi, J. E Clark //Transportation research record. – 1997. – Vol. 1603. – P. 150–155.
15. Samadi, S. Performance evaluation of intelligent adaptive traffic control systems: A case study/ S. Samadi et al. //Journal of transportation technologies. – 2012. – Vol. 2. – P. 248 – 259
16. Jansuwan, S. Assessment of area traffic control system in bangkok by the microscopic simulation model/ S. Jansuwan, S. Narupiti //Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2005. –Vol. 5. – P. 1367–1378.

17. Wahlstedt, J. Evaluation of the two self-optimising traffic signal systems Utopia/Spot and ImFlow, and comparison with existing signal control in Stockholm, Sweden/ J. Wahlstedt //16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013) – 2013. – Vol. 1. – P. 1541–1546.

REFERENCES

1. De Souza, Allan M., et al. "Traffic management systems: A classification, review, challenges, and future perspectives." *International Journal of Distributed Sensor Networks* 13.4 (2017): 1550147716683612.
2. Slavin, Courtney, et al. "Statistical study of the impact of adaptive traffic signal control on traffic and transit performance." *Transportation Research Record* 2356.1 (2013): 117-126.
3. An, Sheng-hai, Byung-Hyug Lee, and Dong-Ryeol Shin. "A survey of intelligent transportation systems." 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. IEEE, 2011.
4. 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.
5. 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* 116 (2018): 89-95.
6. De Souza AM and Villas L. A fully-distributed traffic management system to improve the overall traffic efficiency. In: 2016 ACM international conference on modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, Malta, 13-17 November 2016. New York: ACM.
7. Vyatkin V. IEC 61499 as enabler of distributed and intelligent automation: State-of-the-art review //IEEE transactions on Industrial Informatics. – 2011. – T. 7. – №. 4. – C. 768-781.
8. Thramboulidis K. IEC 61499 in factory automation //Advances in Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering. – 2007. – C. 115-124.
9. Lyu, Guolin, and Robert William Brennan. "Towards IEC 61499-Based Distributed Intelligent Automation: A Literature Review." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17.4 (2020): 2295-2306.
10. Elkin D., Vyatkin V. (2021) Distributed Traffic Control Method Based on Interconnected Agents. In: Silhavy R. (eds) Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. CSOC 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 228. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77448-6_53
11. Lopez P. A. et al. Microscopic traffic simulation using sumo //2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). – IEEE, 2018. – C. 2575-2582
12. Certificate of state registration of the computer program No. 2022611874 Russian Federation. Software for counting the number of agents for managing traffic on a section of the road network: No. 2022610650: Appl. 01/13/2022 publ. 02.02.2022 / D. M. Elkin. – EDN РУПАКИ.
13. ОДМ 218.6.003–2011 Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах
14. Andrews, C. M. Evaluation of New Jersey route 18 OPAC/MIST traffic-control system/ C. M. Andrews, S. M. Elahi, J. E Clark //Transportation research record. – 1997. – Vol. 1603. – P. 150–155.
15. Samadi, S. Performance evaluation of intelligent adaptive traffic control systems: A case study/ S. Samadi et al. //Journal of transportation technologies. – 2012. – Vol. 2. – P. 248 – 259
16. Jansuwan, S. Assessment of area traffic control system in bangkok by the microscopic simulation model/ S. Jansuwan, S. Narupiti //Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2005. –Vol. 5. – P. 1367–1378.

17. Wahlstedt, J. Evaluation of the two self-optimising traffic signal systems Utopia/Spot and ImFlow, and comparison with existing signal control in Stockholm, Sweden/ J. Wahlstedt //16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013) – 2013. – Vol. 1. – P. 1541–1546

ОБ АВТОРАХ / ABOUT THE AUTHORS

Елькин Дмитрий Максимович – Южный федеральный университет; e-mail: delkin@sfnu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +7 8634 36-08-39; Институт компьютерных технологий и информационной безопасности; ассистент.

Elkin Dmitriy Maksimovich - Southern Federal University; e-mail: delkin@sfnu.ru; 2, Chehova street, Taganrog, 347928, Russia, phone: +7 8634 36-08-39; the Institute of computer technologies and information security; assistant professor.

Дата поступления в редакцию: 12.03.2022

После рецензирования: 23.04.2022

Дата принятия к публикации: 13.06.2022