

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54>

УДК 656

Разработка модели транспортных потоков на улично-дорожной сети города

Докт. техн. наук Д. В. Капский¹⁾, Д. В. Навой¹⁾, докт. техн. наук П. А. Пегин²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2019

Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Рассмотрены вопросы создания модели управления дорожным движением для минимизации задержек на улично-дорожной сети, предлагаемой в качестве инновационной при развитии интеллектуальной транспортной системы крупнейшего города – Минска. Разработанная модель имеет комплексную структуру алгоритмического обеспечения. Модель первого уровня реализована на основе нечеткой логики, для чего разработана программа и определены условия, а также смоделирована работа светофорного объекта на реальном локальном перекрестке Минска, который включен в автоматизированную систему управления дорожным движением. Инновацией в модели первого уровня является подход в определении условий при нахождении нечеткого множества без использования стандартного алгоритма – алгоритма местного гибкого регулирования. Предложена и исследована модель, работающая на основе оперативно получаемых параметров интенсивности движения транспортных потоков в характерных точках (сечениях) улично-дорожной сети. Эффективность модели первого уровня составила 8 % за счет оптимизации светофорного цикла (сокращения задержек транспорта при проезде стоп-линий). Результаты моделирования с использованием предлагаемой компьютерной программы позволили повысить эффективность управления дорожным движением на исследованной магистрали (Логойский тракт) в городе Минске на 15 % за счет снижения уровня задержек при односторонней координации. Алгоритм уже реализован в составе действующей автоматизированной системы управления дорожным движением в Минске и показал свою эффективность. Однако данную эффективность можно увеличить, если использовать его совместно с алгоритмом поиска максимального объема движения в цикле при распределенном импульсе интенсивности. Планируется учесть эту особенность при наращивании возможностей алгоритмизации управления движением.

Ключевые слова: дорожное движение, управление движением, алгоритмы управления, автоматизированная система управления дорожным движением, интеллектуальная транспортная система, эффективность, качество, координированное регулирование

Для цитирования: Капский, Д. В. Разработка модели транспортных потоков на улично-дорожной сети города / Д. В. Капский, Д. В. Навой, П. А. Пегин // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 1. С. 47–54. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54>

Development of Model for Traffic Flows on Urban Street and Road Network

D. V. Kapskiy¹⁾, D. V. Navoy¹⁾, P. A. Pegin²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. The paper considers issues pertaining to creation of a model for controlling road traffic with the purpose to minimize delays on street and road network, which is proposed as an innovative one while developing an intelligent transport system of the large city that is Minsk. The developed model has a complex structure of algorithmic support. The first-level model has been implemented on the basis of fuzzy logic, for which a program has been developed and conditions have been

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-70
oapdd_atf@bntu.by

Address for correspondence

Kapskiy Denis V.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-70
oapdd_atf@bntu.by

determined, and operation of traffic light at a real local intersection of Minsk, which is included in the automated traffic management system, has been simulated. Innovation in the first-level model is an approach in determining conditions while detecting a fuzzy set without using a standard algorithm that is an algorithm of local flexible regulation. The paper proposes and investigates a model that works on the basis of operationally obtained parameters of traffic flow intensity at characteristic points (sections) of street and road network. Efficiency of the first-level model has been equal to 8 % due to optimization of a traffic light cycle (reduction of transport delays during passage of stop lines). Results of the simulation using the proposed computer program have made it possible to improve efficiency of traffic management on the studied highway (Logoysky trakt) in Minsk city of Minsk by 15 % due to decrease of delay level in case of unilateral coordination. The algorithm has been already implemented as part of the current automated traffic management system in the city of Minsk and it has shown its efficiency. However this efficiency can be increased if it is used together with an algorithm for searching maximum volume of motion in a cycle with a distributed intensity pulse. It has been planned to take into account this specific feature when increasing possibilities for algorithmization of traffic management.

Keywords: road traffic, traffic management, management algorithms, automated traffic management system, intelligent transport system, efficiency, quality, coordinated regulation

For citation: Kapskiy D. V., Navoy D. V., Pegin P. A. (2019) Development of Model for Traffic Flows on Urban Street and Road Network. *Science and Technique*. 18 (1), 47–54. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54> (in Russian)

Введение

За последние десятилетия разработано немало детерминированных и стохастических моделей систем управления дорожным движением для решения транспортных и инженерных проблем на дорогах. Рассмотрим приведенные в различных источниках модели систем управления дорожным движением, работающих на нечеткой логике. Цель – определить, как вопросы таких систем формализованы в представленных моделях.

А. Хеги с соавторами в 2001 г. [1] представили модель системы поддержки управленческих решений для центров управления дорожным движением, основанная на применении нечеткой логики в выборе сценариев управляющих воздействий для каждой конкретной дорожно-транспортной ситуации. В то же время группой исследователей [2] представлена концепция, основанная на нечеткой логике, названная «Значительная срочная фаза и незначительная срочная фаза». Концепция устанавливает правила выбора управляющих воздействий, базирующиеся на нечеткой логике, для оптимизации параметров транспортного потока и минимизации задержек транспорта на светофорных объектах.

С. Чоу и Дж. Тенг в 2002-м [3] предложили дорожный контроллер (FTJSC), работа которого основана на нечеткой логике. Контроллер позволяет управлять регулируемыми, последовательно расположенными пересечениями с учетом количества полос, длины транспортных средств и ширины улицы. К. Куо и Дж. Лин в 2002 г. [4] пошли еще дальше и разработали процедуру расчета изменения и сдвига интервалов светофора на основе модели системы управления дорожным движением с нечеткой логикой. Эта процедура расчета основана на

предположении, что «принятие решения водителем на регулируемом пересечении основано на неточной или нечеткой информации».

И. Косонен в 2003 г. [5] представил модель системы управления дорожным движением, основанную на нечетком управлении работой сигналов светофора. В основу модели положен алгоритм, позволяющий обеспечить контроль работы светофорных объектов с помощью системы принятия решений, базирующейся на нечеткой логике. М. Халид, С. Си и Р. Юзоф в 2004-м [6] предложили нечеткую модель системы управления светофорами при помощи шести фаз для светофорного объекта с четырьмя входами. В основу «нечеткого» дорожного контроллера положены три модуля: «Следующая фаза», «Зеленая фаза», «Модуль принятия решений». Система позволяла осуществлять связь между соседними дорожными контроллерами и управлять последовательностью и длиной фаз в адаптивном режиме в зависимости от интенсивности движения, остановок (времени ожидания) и задержек (заторов).

Т. Акияма и М. Окушима в 2006 г. [7] модифицировали дорожный контроллер с постоянными переменными, оптимизирующий параметры лингвистических переменных с нечетким обоснованием, и предложили более совершенное управление дорожным движением на основе нечеткой логики в качестве расширения для обычного контроля за дорожным движением с целью снижения заторов на автомагистралях в Японии.

Е. Бакери с соавторами в 2007-м [8] предложили модель «нечеткого» контроля управления сигналами светофоров как продвинутую подсистему в составе системы управления дорожным движением, используя алгоритм Мам-

дани для сокращения среднего времени ожидания и длины очереди.

Также Я. Ху, П. Томас и Р. Стониер в 2007 г. [9] создали модель системы контроля дорожного движения на базе нечеткой логики, позволявшей управлять реальным локальным перекрестком, состоящим из пяти входов, 14 полос для движения транспорта, включая шесть поворотных транспортных и два пешеходных направления. Эволюционный алгоритм создавал (генерировал) правила контроля, основанные на применении нечеткой логики, с использованием реальных параметров транспортного потока, поступающих с перекрестка.

Я. Занг и З. Йе в 2008-м [10] предложили методологию системы, основанной на нечеткой логике, для прогнозирования параметров транспортного потока с использованием двойного петлевого детектора транспорта. Результаты прогнозирования показали, что система, базирующаяся на нечеткой логике, дает более точные и устойчивые прогнозные показатели. Также система показала высокую надежность при прогнозировании параметров транспортных потоков для различных состояний транспортного потока и детекторов транспорта.

Авторы [11] в 2009 г. представили модель управления дорожным движением на локальном перекрестке на основе алгоритма Сугено. Сравнительный анализ между моделью управления, основанной на нечеткой логике,

и моделью управления с зафиксированным циклом регулирования показал более высокую эффективность модели системы управления дорожным движением, базирующейся на алгоритме Сугено [12–14].

Модель транспортных потоков

Трехуровневая модель предназначена для расчета параметров транспортных потоков на улично-дорожной сети (УДС) и предоставления пользователям (водителям) информации о маршрутах следования для минимизации задержек на сети [13–15]. Предлагаемая трехуровневая модель представляет собой связующее звено между автоматизированной системой управления дорожным движением (АСУДД) и системой контроля инцидентов и маршрутного ориентирования в составе интеллектуальной транспортной системы (ИТС) (рис. 1).

Трехуровневая модель включает в себя модели первого и второго уровней. Модель первого уровня (Модель-1) реализуется на основе нечеткой логики и предназначена для расчета параметров УДС на локальном перекрестке с минимизацией задержек на локальном уровне. Модель второго уровня (Модель-2) предназначена для расчета параметров транспортных потоков на магистральном уровне с минимизацией задержек и синхронизацией работы светофорных объектов по рассматриваемым маршрутам.



Рис. 1. Трехуровневая модель как связующее звено

Fig. 1. Three-level model as connecting link

Трехуровневая модель (Модель-3) на основании полученных от Модели-1 и Модели-2 данных: рассчитывает кратчайшие пути по запрашиваемому пользователям маршруту; анализирует данные по задержкам, коэффициентам загрузки полос для различных путей по запрашиваемому маршруту; выбирает оптимальный с точки зрения системы маршрут; доводит маршрут до пользователей (водителей); мониторинг поведение водителей; вырабатывает управляющие воздействия в случае изменения поведения водителей.

Параметры исходных данных трехуровневой модели представлены на рис. 2.

Модели управления дорожным движением, как правило, решают две проблемы: последовательность включения регулируемых направлений в цикле и продолжительность разрешающих сигналов для регулируемых направлений.

Первым шагом в создании модели управления дорожным движением, основанной на нечеткой логике, является определение набора входных параметров. Входные параметры для предлагаемой модели включают в себя:

- уровень текущей дорожной ситуации (нахождение автомобиля внутри детектируемой зоны);
- уровень последовательности включения регулируемых направлений или фаз (последовательность включения разрешающих сигналов);
- стратегический фазовый уровень (продолжительность горения сигналов светофора).

Предлагаемая модель управления дорожным движением предполагает следующие допущения:

- не учитываются длина транспортных средств и дистанция между транспортными средствами;
- используется установленный график регулирования для светофорного объекта на пересечении ул. Кижеватова – ул. Серова в г. Минске;
- разрабатывается для перекрестка с локальным адаптивным управлением, имеющим четыре входа, неограниченное количество полос движения и следующее базовое чередование фаз регулирования: P1–P2–P3–P6;
- пешеходные направления в нечеткой модели не учитывались, так как необходима установка табло вызова пешеходами.

Перекресток ул. Кижеватова – ул. Серова имеет шесть фаз регулирования с базовым циклом регулирования в режиме КУ–ЛУ (координированный, локальный режимы) 110 с (рис. 3).

Существующий алгоритм управления реализует адаптивный режим, который действует с использованием логических условий, основанных на минимальной и максимальной длительности разрешающего сигнала и набора переходных интервалов для заданных условий смены фаз регулирования.

Расстановка технических средств организации дорожного движения и детекторов транспорта представлена на рис. 4.



Рис. 2. Параметры исходных данных трехуровневой модели

Fig. 2. Parameters of initial data for three-level model

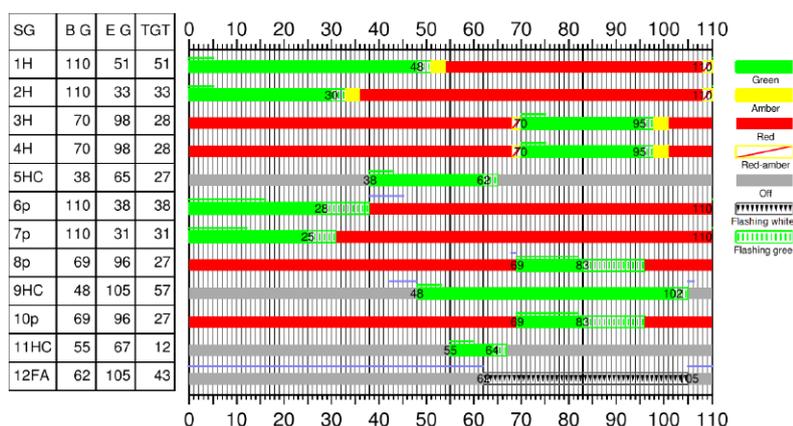


Рис. 3. Существующий график регулирования на пересечении улиц Кижеватова – Серова

Fig. 3. Current traffic control schedule for Kizhevator – Serov street intersection

Существующие параметры транспортной нагрузки по времени суток приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры транспортной нагрузки
Parameters of traffic load

Направление	Время суток			
	8:00	9:00	17:00	18:00
1н	952	752	1416	1352
2н	1244	716	940	880
3н	536	412	324	388
4н	484	444	572	620
5нс	480	476	360	176
11нс	152	160	140	192

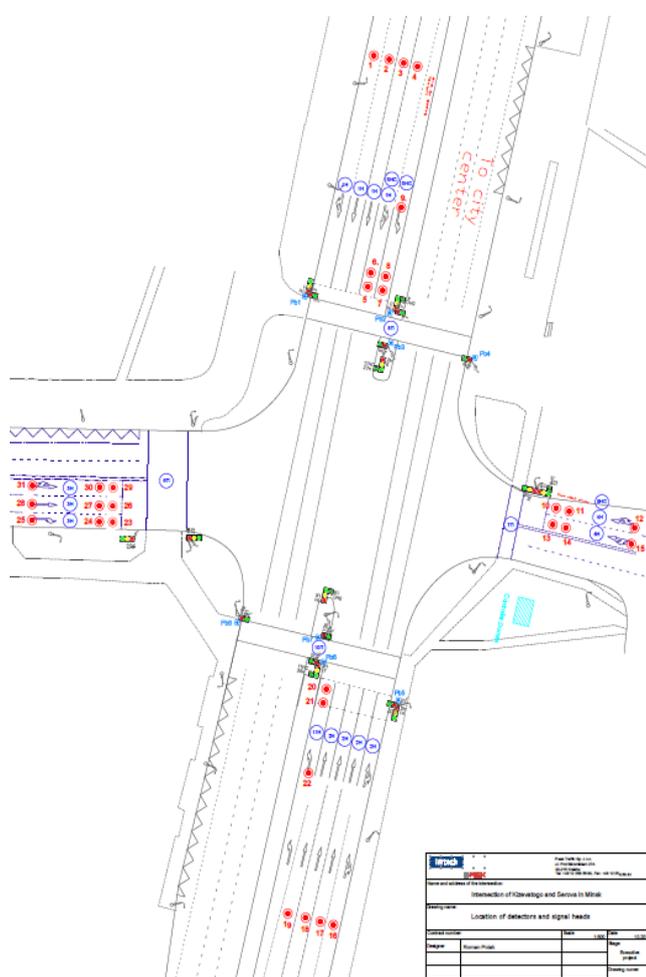


Рис. 4. Расстановка технических средств организации дорожного движения (детекторов транспорта) на пересечении улиц Кижеватова – Серова

Fig. 4. Arrangement of technical facilities for organization of road traffic (transport detectors) at Kizhevator – Serov street intersection

Предлагаемая модель получает данные и присваивает их соответствующим функциям и значениям истинности (фаззификация). Затем модель объединяет результаты полученных значений (механизм логического вывода). Алгоритм Мамдани и центроидный метод (метод простого суммирования в факторном анализе) используются для создания «нечеткой» модели путем создания связи между входами и выходами «нечетких» областей в форме if – then (если – то) [4].

Объединенные результаты далее конвертируются обратно в специфические предупреждающие заявления или действия (дефаззификация). В исследованиях также использовался метод усреднения максимума. Структура модели представлена на рис. 5.

Нечеткая логика началась с концепции нечеткого множества. Предлагаемая модель имеет шесть входов и шесть выходов. Все входы и выходы лингвистически определены как: очень малое, малое, среднее, большое, очень

большое. Члены функций представляют величину входной и выходной переменных для фаз и направлений регулирования.

Основной целью определения нечетких правил являются корректировка продолжительности светофорного цикла и минимизация неиспользуемого времени разрешающих сигналов в фазе регулирования.

Нечеткие правила определяют различные сценарии, как показано на рис. 5, и с использованием if-then.

Для моделирования применяем программный пакет MatLab fuzzy logic. Модель состоит из 42 нечетких правил, как показано на рис. 6. Функции входных и выходных переменных показаны на рис. 7, 8, редактор нечетких правил – на рис. 9.

Для проведения эксперимента сделано сравнение длительности базового цикла и продолжительности фаз регулирования с предложенной моделью, полученной в результате мо-

делирования. Данные о параметрах транспортных потоков собраны с помощью детекторов транспорта, расположенных, как показано на рис. 4. Результаты моделирования приведены на рис. 10.

В результате проведенной итерации получено значение светофорного цикла 101 с. При проведении еще пяти итераций для различных параметров входных переменных (интенсивностей движения) получено снижение продолжительности светофорного цикла в среднем на 8 % при предлагаемой модели нечеткого светофора. Теоретические результаты вполне коррелируют с экспериментальными данными исследования импульсов интенсивности транспортных потоков (рис. 11).

В качестве примера результаты моделирования (алгоритм нахождения максимальной площади) по объекту «Логойский тракт от ул. Калиновского до завода «Термопласт» (перегон 226 м, $T_{\text{зел}} = 30$ с)» приведены на рис. 12.

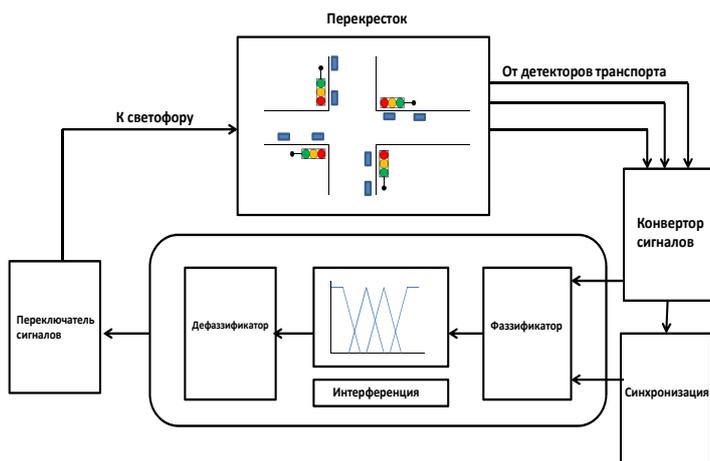


Рис. 5. Структура модели первого уровня
Fig. 5. Structure of 1st level model

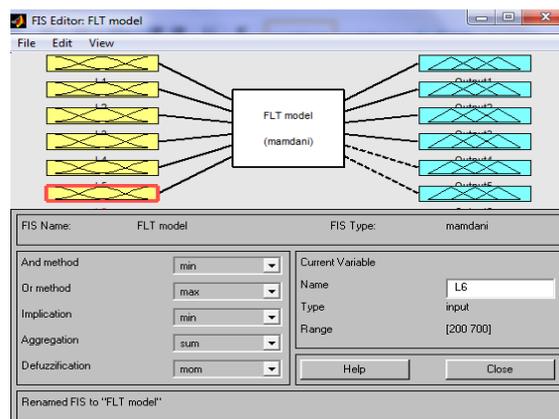


Рис. 6. Предлагаемая нечеткая модель первого уровня
Fig. 6. Proposed fuzzy model of 1st level

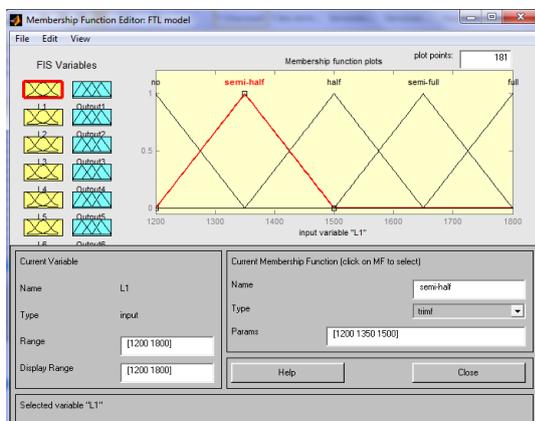


Рис. 7. Функции входных переменных
Fig. 7. Functions of input variables

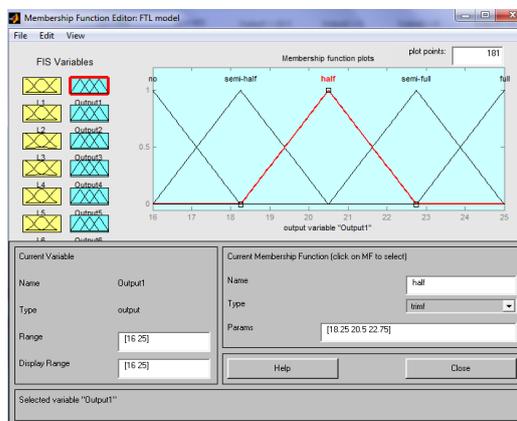


Рис. 8. Функции выходных переменных
Fig. 8. Functions of output variables

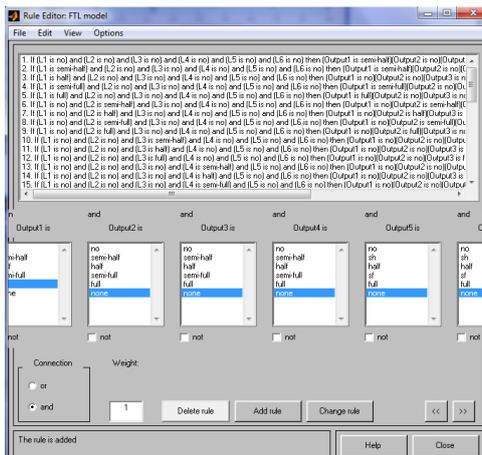


Рис. 9. Редактор нечетких правил
Fig. 9. Editor of fuzzy rules

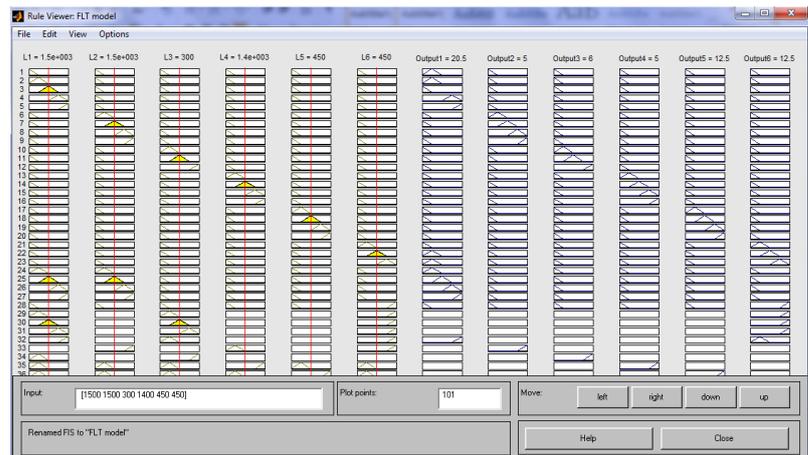


Рис. 10. Результаты моделирования
Fig. 10. Modeling results

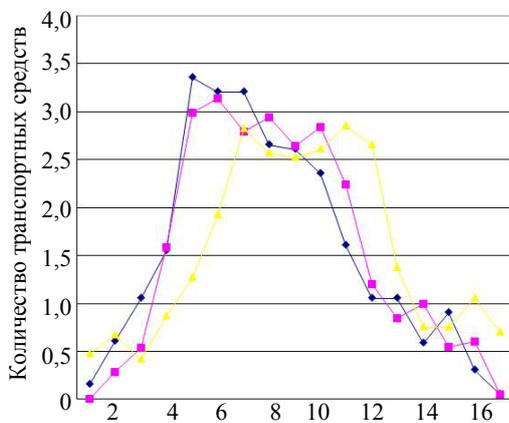


Рис. 11. Распределение импульсов интенсивности по объекту «Логойский тракт – «Термопласт» (перегон):
—◆— 226; —■— 268; —▲— 307
Fig. 11. Distribution of intensity impulses for “Logoysky Tract – “Thermoplast” object (leg of a route):
—◆— 226; —■— 268; —▲— 307

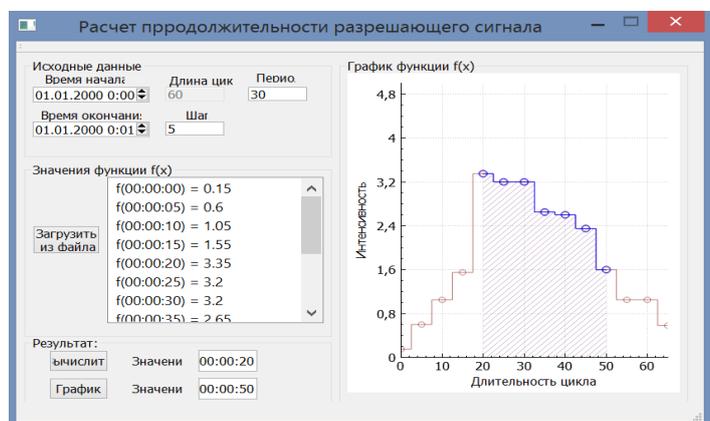


Рис. 12. Результаты моделирования при нахождении максимальной длительности разрешающего сигнала для минимизации задержек
Fig. 12. Modeling results while having maximum duration of permissive signal in order to minimize delays

ВЫВОДЫ

1. Разработана модель управления дорожным движением для минимизации задержек на улично-дорожной сети, предлагаемая в качестве инновационной при создании (на базе автоматизированной системы управления дорожным движением) и развитии интеллектуальной транспортной системы г. Минска. Модель имеет комплексную структуру. Модель первого уровня реализована на основе нечеткой логики. Разработана программа, определены условия и смоделирована работа светофорного объекта на реальном локальном перекрестке г. Минска. Инновацией в модели первого уровня является подход в определении условий при нахождении

нечеткого множества без использования алгоритма местного гибкого регулирования.

2. Предложена и исследована модель, работающая на основе параметров интенсивности движения транспортных потоков в характерных точках. Эффективность модели первого уровня составила 8 % за счет оптимизации светофорного цикла.

3. Результаты моделирования с использованием предлагаемой компьютерной программы позволили повысить эффективность управления дорожным движением на исследованной магистрали (Логойский тракт) на 15 % за счет снижения уровня задержек при односторонней координации. Алгоритм уже реализован в составе действующей автоматизированной системы

управления дорожным движением в г. Минске и показал свою эффективность. Однако данную эффективность можно увеличить, если использовать его совместно с алгоритмом поиска максимального объема движения в цикле при распределенном импульсе интенсивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. A Fuzzy Decision Support System for Traffic Control Centers / A. Hegyi [et al.] // In Proceedings of the 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC'01). California: Oakland, 2001. P. 358–363.
2. Varaiya, P. Max Pressure Control of a Network of Signalized Intersections. *Transportation Research, Part C / P. Varaiya* // *Emerging Technologies*. 2013. Vol. 36. P. 177–195.
3. Chou, C. A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junction Signals / C. Chou, J. Teng // *Information Sciences*. 2002. Vol. 143. P. 73–97.
4. Kuo, K. Application of Fuzzy Set Theory to the Change Intervals at a Signalized Intersection / K. Kuo, J. Lin // *Fuzzy Sets and Systems*. 2002. Vol. 129. P. 387–403.
5. Kosonen, I. Multi-Agent Fuzzy Signal Control Based on Real-Time Simulation / I. Kosonen // *Transportation Research, Part C. Emerging Technologies*. 2003. Vol. 1. P. 389–403.
6. Khalid, M. Control of a Complex Traffic Junction Using Fuzzy Inference / M. Khalid, C. See, R. Yusof // In 5th Asian Control Conference, 20–23 July 2004. Vol. 3. P. 1544–1551.
7. Akiyama, T. Advanced Fuzzy Traffic Controller for Urban Expressways / T. Akiyama, M. Okushima // *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 2006. Vol. 2, No 2. P. 339–355.
8. A Novel Fuzzy Control Model of Traffic Light Timing at an Urban Intersection / E. Bagheri [et al.] // In 3rd Information and Knowledge Technology Conference. Iran: Mashhad, 2007. P. 1–5.
9. Hu, Y. Fuzzy Control of Traffic Signals Accompanying Pedestrian Crossings / Y. Hu, P. Thomas, R. Stonier // In Proceedings of the 2007 WSEAS International Conference on Computer Engineering and Applications, Gold Coast, Jan. 17–19. Australia, 2007. P. 288–292.
10. Zhang, Y. Short-Term Traffic Flow Forecasting Using Fuzzy Logic System Methods / Y. Zhang, Z. Ye // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2008. Vol. 12, No 3. P. 102–112.
11. Lai, Guan Rhung. Fuzzy Traffic Light Controller Using Sugeno Method for Isolated Intersection / Guan Rhung Lai, Che Soh Azura, Zafira Abdul Rahman Ribhan // Proceedings of 2009 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED-2009).
12. Воробьев, Э. М. АСУ дорожным движением / Э. М. Воробьев, Д. В. Капский. Минск: УП «НИИСА», 2005. 88 с.
13. Координированное управление дорожным движением / Ю. А. Врубель [и др.]. Минск: БНТУ, 2011. 230 с.
14. Автоматизированные системы управления дорожным движением / Д. В. Капский [и др.]. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2015. 368 с.
15. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.

Поступила 05.03.2018
 Подписана в печать 22.05.2018
 Опубликовано онлайн 30.01.2019

REFERENCES

1. Hegyi A., De Schutter B., Hoogendoorn S., Babuska R., van Zuylen H., Schuurman H. (2001) A Fuzzy Decision Support System for Traffic Control Centers. *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No 01TH8585)*. California, Oakland, 358–363. <https://doi.org/10.1109/itsc.2001.948683>.
2. Varaiya P. (2013) Max Pressure Control of a Network of Signalized Intersections. *Transportation Research, Part C. Emerging Technologies*, 36, 177–195. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.08.014>.
3. Chou C., Teng J. (2002) A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junction Signals. *Information Sciences*, 143, 73–97. [https://doi.org/10.1016/s0020-0255\(02\)00199-8](https://doi.org/10.1016/s0020-0255(02)00199-8).
4. Kuo K., Lin J. (2002) Application of Fuzzy Set Theory to the Change Intervals at a Signalized Intersection. *Fuzzy Sets and Systems*, 129, 387–403. [https://doi.org/10.1016/s0165-0114\(01\)00174-9](https://doi.org/10.1016/s0165-0114(01)00174-9).
5. Kosonen I. (2003) Multi-Agent Fuzzy Signal Control Based on Real-Time Simulation. *Transportation Research, Part C. Emerging Technologies*, 1, 389–403. [https://doi.org/10.1016/s0968-090x\(03\)00032-9](https://doi.org/10.1016/s0968-090x(03)00032-9).
6. Khalid M., See C., Yusof R. Control of a Complex Traffic Junction Using Fuzzy Inference. *5th Asian Control Conference*, 20–23 July 2004, 3, 1544–1551.
7. Akiyama T., Okushima M. (2006) Advanced Fuzzy Traffic Controller for Urban Expressways. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2 (2), 339–355.
8. Bagheri E., Feizi M., Ensan F., Behnia F. (2007) A Novel Fuzzy Control Model of Traffic Light Timing at an Urban Intersection. *3rd Information and Knowledge Technology Conference*. Iran, Mashhad, 1–5.
9. Hu Y., Thomas P., Stonier R. (2007) Fuzzy Control of Traffic Signals Accompanying Pedestrian Crossings. *Proceedings of the 2007 WSEAS International Conference on Computer Engineering and Applications, Gold Coast*. Australia, 288–292.
10. Zhang Y., Ye Z. (2008) Short-Term Traffic Flow Forecasting Using Fuzzy Logic System Methods. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 12 (3), 102–112. <https://doi.org/10.1080/15472450802262281>.
11. Lai Guan Rhung, Che Soh Azura, Zafira Abdul Rahman Ribhan (2009) Fuzzy Traffic Light Controller Using Sugeno Method for Isolated Intersection. *Proceedings of 2009 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED-2009)*. <https://doi.org/10.1109/scored.2009.5442955>.
12. Vorobiov E. M., Kapskii D. V. (2005) *Automatic Control Systems (ACS) for Road Traffic*. Minsk, Unitary Enterprise “Research Institute of Automation Facilities”. 88 (in Russian).
13. Vrubel' Yu. A., Kapskii D. V., Rozhanskii D. V., Navoi D. V., Kot E. N. (2011) *Coordinated Control of Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 230 (in Russian).
14. Kapskii D. V., Vrubel' Yu. A., Rozhanskii D. V., Navoi D. V., Kot E. N. (2015) *Automated Control Systems for Road Traffic*. Minsk, Novoye Znanie Publ. 368 (in Russian).
15. Vrubel' Yu. A., Kapskii D. V., Kot E. N. (2006) *Determination of Losses in Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 240 (in Russian).

Received: 05.03.2018
 Accepted: 22.05.2018
 Published online: 30.01.2019