

**Черный С. П., Муравьев Е. М., Иванов Д. Р.**  
**S. P. Cherniy, E. M. Muraviev, D. R. Ivanov**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГОРОДСКОГО ТРАФИКА**

### **SIMULATION OF A FUZZY URBAN TRAFFIC CONTROL SYSTEM**

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [keapu@knastu.ru](mailto:keapu@knastu.ru).

**Sergej P. Cherniy** – PhD in in Engineering, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [keapu@knastu.ru](mailto:keapu@knastu.ru).

**Муравьев Евгений Максимович** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [epapu@knastu.ru](mailto:epapu@knastu.ru).

**Evgenij M. Muraviev** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [epapu@knastu.ru](mailto:epapu@knastu.ru).

**Иванов Данила Романович** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [epapu@knastu.ru](mailto:epapu@knastu.ru).

**Danila R. Ivanov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [epapu@knastu.ru](mailto:epapu@knastu.ru).

**Аннотация.** В представленной работе проведён анализ существующих систем управления регулированием городского трафика с применением оценки движущихся объектов по основным направлениям движения и учётом выделенного интервала для перемещения пешеходов. Представленные зависимости загруженности перекрёстка получены со средств визуального наблюдения, штатно установленных для контроля дорожной обстановки в городских условиях, и учитывают различные категории транспортных средств и особенности их передвижения. На основе средств дискретно-событийного моделирования и результатов визуального наблюдения получена имитационная модель классической системы управления. Выявлены недостатки использования классической схемы регулирования, которая не позволяет учитывать целый ряд параметров, связанных с недетерминированными изменениями в городском трафике. Для снижения влияния возмущающих факторов и увеличения пропускной способности в работе предложена интеллектуальная система регулирования фаз переключения светофоров перекрёстка, учитывающая количество и особенности перемещения различных участников дорожного движения. Приведены сравнительные характеристики при регулировании фаз работы светофора для классической и интеллектуальной систем управления, показаны достоинства нечёткой системы управления регулированием городского трафика при её сравнении с классическим аналогом, а также представлены возможности таких систем для дальнейшего гибкого расширения и распространения в условиях взаимного влияния перекрёстков друг на друга.

**Summary.** In the presented work, an analysis of existing control systems for regulating urban traffic is carried out using the assessment of moving objects in the main directions of movement and taking into account the allocated interval for the movement of pedestrians. The presented dependencies on the congestion of the intersection are obtained from the means of visual observation, which are normally installed to monitor the road situation in urban conditions and take into account various categories of vehicles and features of their movement. Based on the means of discrete event modeling and the results of visual observation, a simulation model of a classical control system is obtained. The disadvantages of using the classical regulation scheme are revealed, which does not allow taking into account a number of parameters associated with non-deterministic changes in urban traffic. To reduce the influence of disturbing factors and increase throughput, an intelligent system for regulating the switching phases of intersection traffic lights is proposed, taking into account the number and features of movement of various road users. Comparative characteristics are given when regulating the phases of traffic light operation for classical and intelligent control systems, the advantages of a fuzzy control system for regulating urban traffic when compared with its classical counterpart are shown, and the possibilities of such systems for further flexible expansion and distribution in conditions of mutual influence of intersections on each other are presented.

**Ключевые слова:** нечёткий логический регулятор, нечёткое множество, лингвистическая переменная, интеллектуальная система управления, контроль городского трафика.

**Key words:** fuzzy logic controller, fuzzy set, linguistic variable, intelligent control system, urban traffic control.

УДК 681.5.01:658.5

**Введение.** В современном мире автоматизированные системы управления встраиваются в различные технологические процессы и сферы деятельности человека. При этом с расширением алгоритмических и вычислительных возможностей для построения систем управления не только расширяются области их применения, но и увеличивается сложность технологических объектов и процессов. Одной из таких сфер является управление транспортными потоками в условиях изменяющегося городского трафика. Существующие алгоритмы управления светофорами не позволяют оптимизировать время проезда перекрёстков из-за возникновения заторов с одной из сторон дороги. Традиционная система управления светофорами работает по заранее заданному расписанию или в режиме, основанном на сенсорных устройствах, таких как петлевые детекторы, встроенные в дорожное покрытие. Однако эти системы не могут адаптироваться к изменяющимся условиям дорожного движения в режиме реального времени.

Регулирование дорожного трафика в условиях растущего количества транспортных средств на сегодняшний момент становится проблемой не только крупных мегаполисов [2; 7]. Разгрузка дорожной сети чаще всего решается либо стандартными методиками регулирования по алгоритму «зелёной волны», либо строительством систем развязок и путепроводов. Эффективность первого подхода зачастую существенно снижается с увеличением количества транспортных средств и отсутствием возможности динамической вариации временных интервалов. Второй способ ограничен как техническими, так и экономическими возможностями. Применение различных методик интеллектуального управления технологическими процессами позволяет реализовывать желаемые законы управления для объектов практически любой сложности, функционирующих в условиях неполноты информации и существенного количества недетерминированных воздействий [4–6]. Проблема переключения фаз светофорного регулирования в условиях различной загруженности направлений различными транспортными средствами (ТС) в условиях растущего городского трафика с применением нечёткого управления представляет собой актуальную задачу.

**Модели и методы.** Для реализации классических способов светофорного регулирования необходимо управлять движением потоков ТС на основе дискретно-событийного моделирования [8–10]. Переключение фаз системы регулирования городского трафика производится на основе заранее определённого планового графика и представляет собой набор строго фиксированных интервалов времени. На рис. 1 представлена имитационная модель перекрёстка, реализованная в среде MATLAB, которая отражает процесс движения ТС, а также позволяет локально на основе подходов дискретно-событийного моделирования оценивать очередность поступления и движения объектов в различные интервалы времени. Визуально модель, представленную на рис. 1, можно разделить на 4 части, соответствующие направлениям движения со всех сторон перекрёстка. Основные фрагменты (см. рис. 2) соединены между собой перекрёстными связями, которые определяют взаимное влияние транспортных потоков на каждое из направлений.

Основными блоками структурной схемы являются:

- подсистемы формирования потоков пешеходов в двух направлениях с определением скорости перемещения одиночного объекта;
- подсистема формирования входящего потока транспортных средств, позволяющая определять типы транспортных средств по габаритам и скорости движения;
- блок формирования взаимного влияния потоков транспортных средств с других направлений перекрёстка.

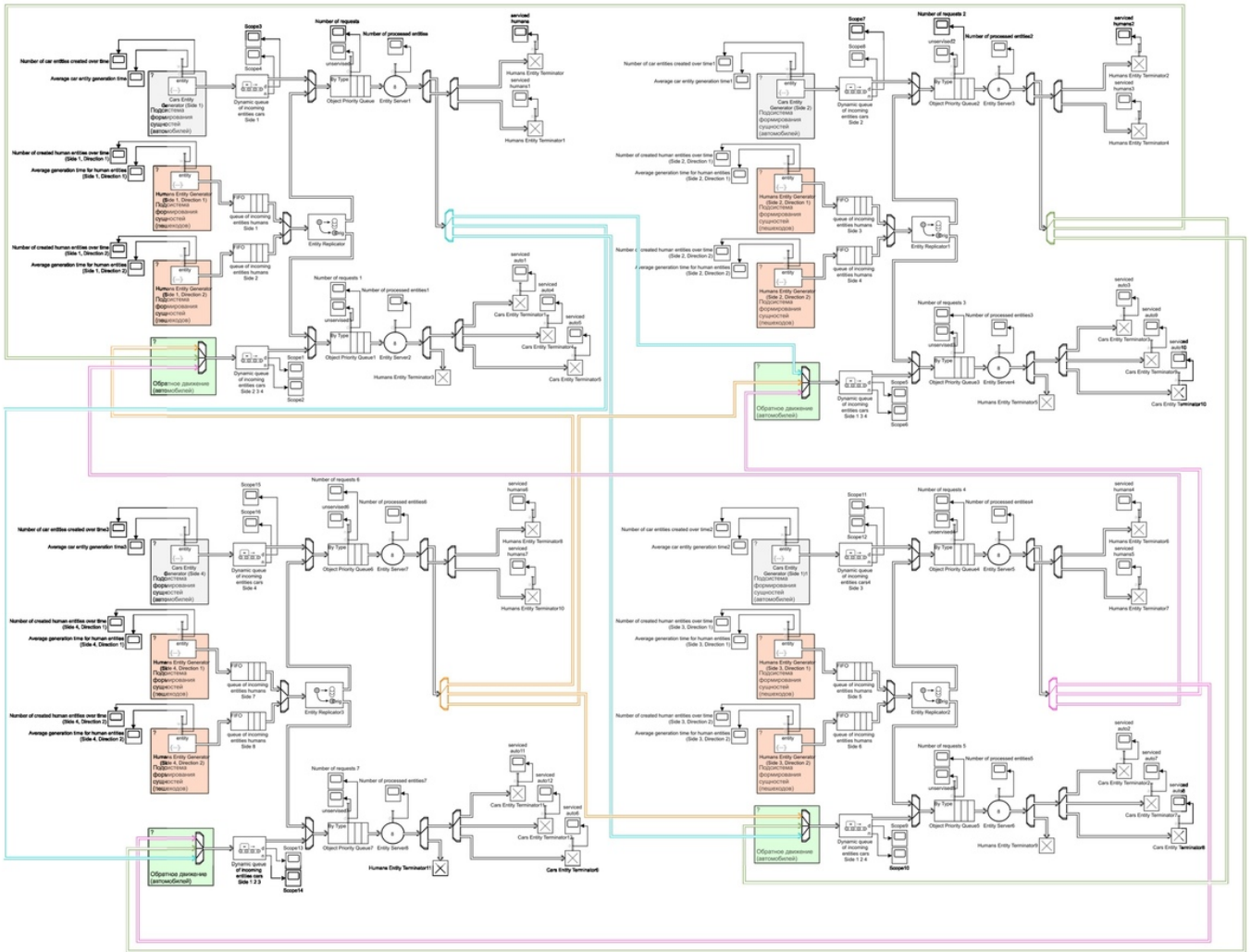


Рис. 1. Имитационная модель с классической системой регулирования перекрёстком с пешеходным переходом

Соединение основных функциональных блоков выполняется посредством звеньев, формирующих очередность прохождения каждой единицы общего трафика движения по всем направлениям. Переключение фаз светофорного регулирования реализовано набором переключателей с соответствующими настройками временных интервалов, заранее определённых схемой регулирования.

На рис. 3 представлены графики, демонстрирующие загруженность проезжей части по направлениям движения на перекрёстке при классической схеме регулирования за один час. На каждом из графиков отражена взаимосвязь количества транспортных средств, ожидающих проезд в определённый временной интервал, которая соответствует одному из четырёх направлений движения через перекрёсток. Контроль входной выборки системы осуществляется стандартными методами на основе системы видеонаблюдения перекрёстка, используемой для фиксации нарушений правил дорожного движения и алгоритмов распознавания образов.

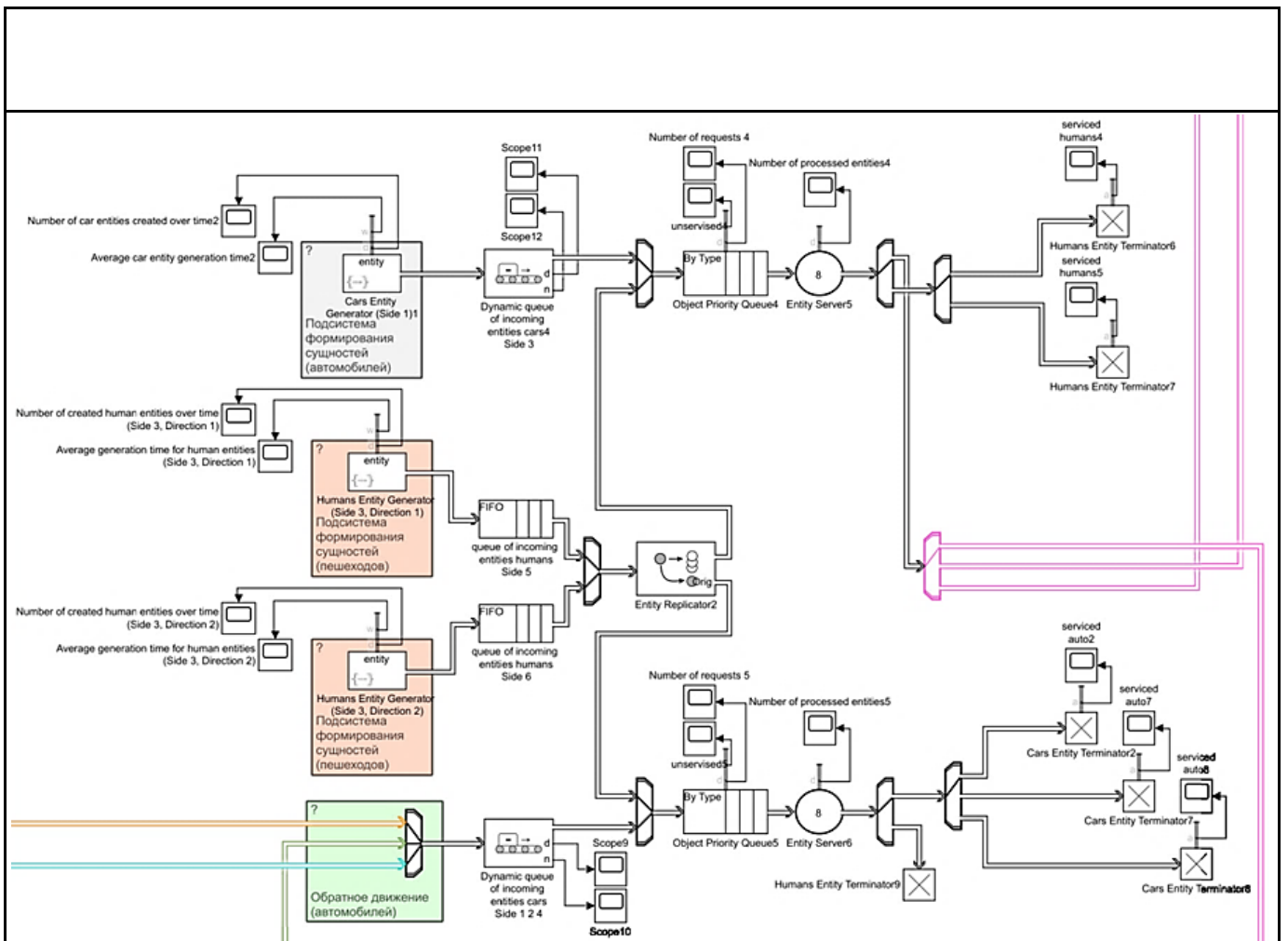


Рис. 2. Фрагмент модели перекрёстка по одному из направлений

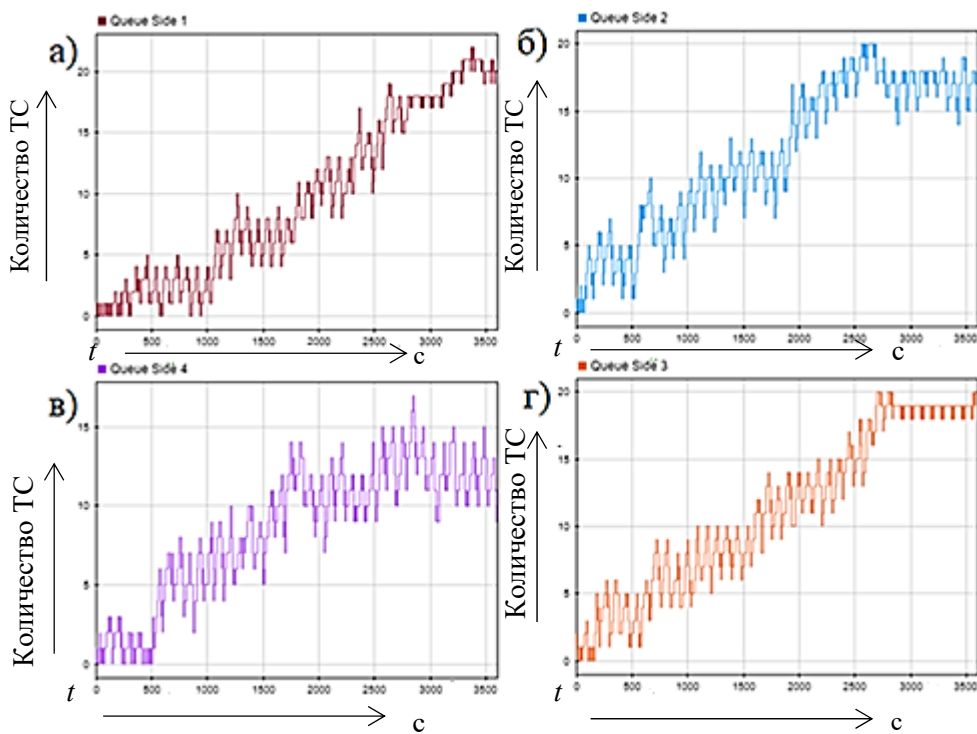


Рис. 3. Графики загрузки по направлениям при классической схеме регулирования

Из графиков, приведённых на рис. 3, видно, что количество ТС в каждом переходном процессе увеличивается до определённого количества, практически выходящего за предел видимости системы идентификации. Это соответствует низкой пропускной способности системы при имеющейся нагрузке ТС на транспортную сеть в час пик, тем самым создаются пробки на проезжей части.

Такая система с классическим управлением показывает стабильность работы в условиях малой плотности населения в регионе либо низкой нагрузки на дорожную сеть. В прочих случаях, когда условия, приведённые выше, не соблюдены, система с использованием классического принципа управления продолжает свою работу в стабильном состоянии, но количество ТС, находящихся непосредственно перед перекрёстком и подъезжающих к нему, создаёт пробку большой протяжённости.

Для улучшения показателей управления светофорным регулированием необходимо применение адаптивных систем управления. Так, например, интеллектуальная система управления светофорами может использовать различные источники данных, такие как видекамеры, датчики движения, информацию о трафике и даже данные смартфонов водителей. Алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта могут анализировать эти данные и принимать решения о регулировании светофоров в режиме реального времени. На рис. 4 представлена структурная схема одного из возможных вариантов построения интеллектуальной системы регулирования с применением нечёткого логического регулятора.

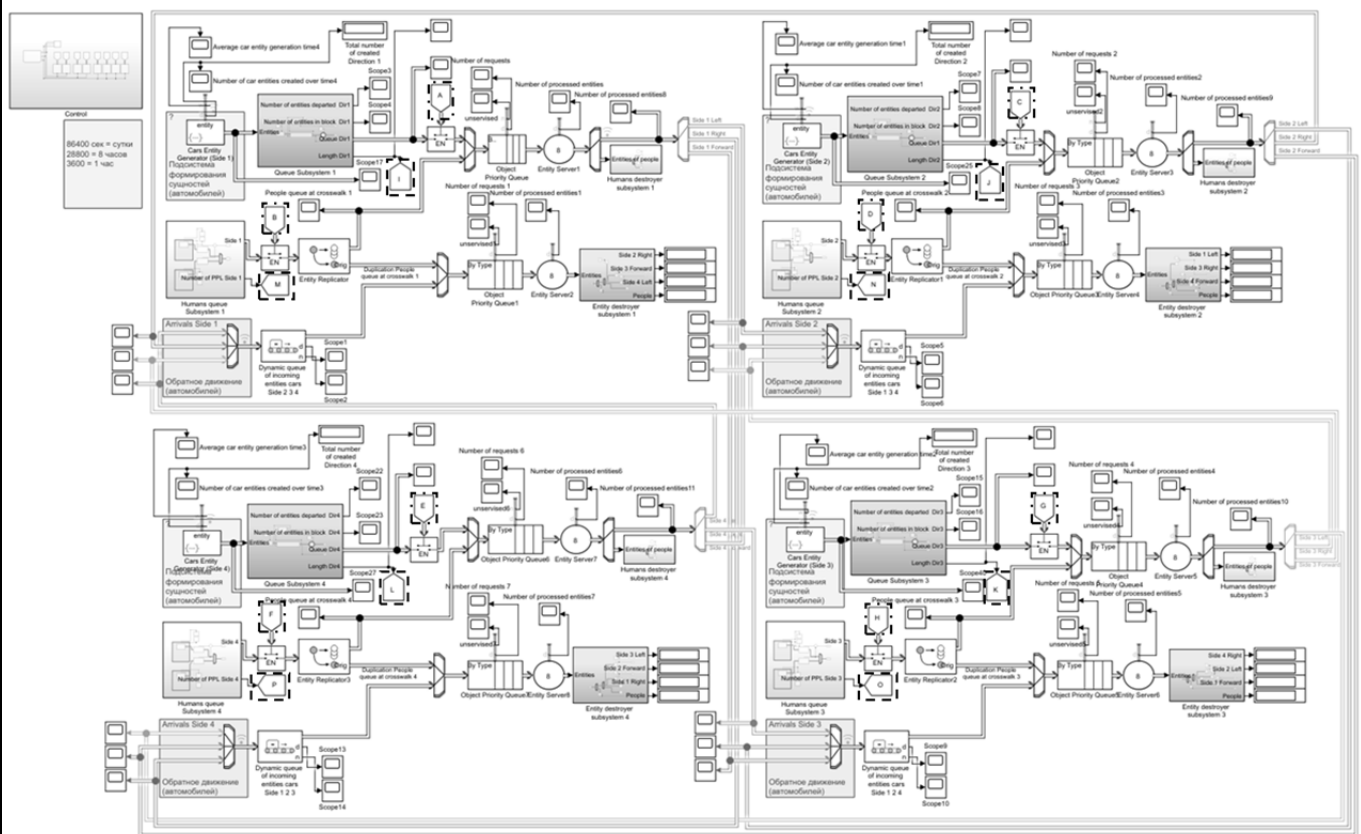


Рис. 4. Имитационная модель с интеллектуальной системой регулирования перекрёстка с пешеходным переходом

Внедрение нечёткого логического регулятора в систему (см. рис. 4) осуществляется путём передачи информации о состоянии основных контролируемых параметров (выделены на модели пунктирной линией), управляющие воздействия помечены, соответственно, штрихпунктирной линией. На рис. 5 представлена функциональная схема нечёткого логического регулятора. Набор пе-

ременных  $I, J, K, L$  формализует понятие входных лингвистических переменных «длина очереди ТС» по каждому направлению, в свою очередь, набор переменных  $M, N, O, P$  аналогично описывает понятие «количество пешеходов» по каждому направлению. Понятия, формируемые выходными лингвистическими переменными, соответствуют переключению фаз: переменные  $A, G$  выполняют смену временного интервала фаз светофора в противоположных направлениях,  $C, E$  – аналогично для ТС, движущихся перпендикулярно; переменные  $B, D, H, F$  производят изменения фаз светофорного регулирования для соответствующих потоков пешеходов.

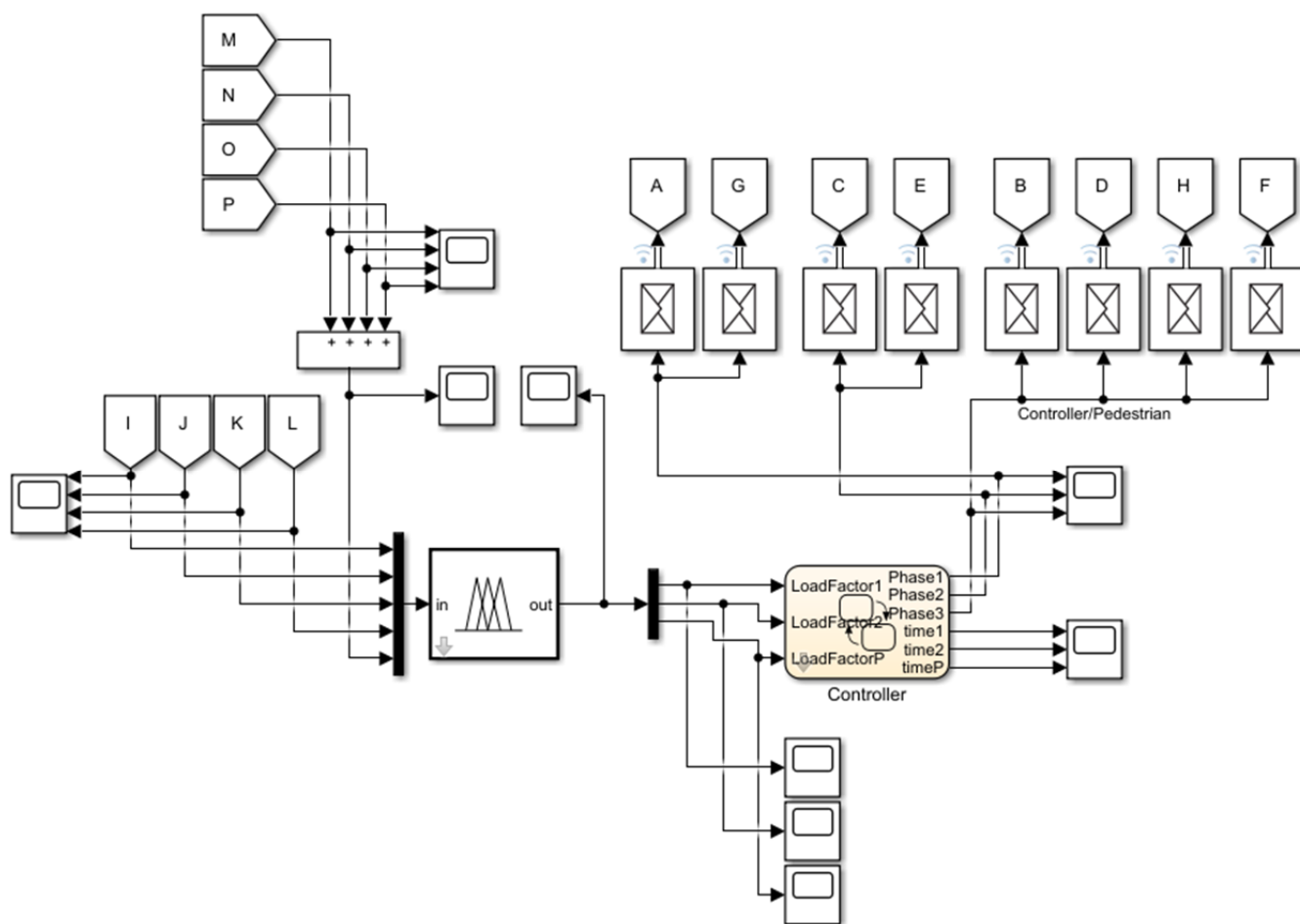


Рис. 5. Функциональная схема нечёткого логического регулятора

Построение интеллектуальной системы управления регулированием такого сложного объекта связано с настройкой нечёткого логического регулятора на основании широко используемых методик [1; 3]. Основной функцией встроенного в данную модель нечёткого логического регулятора является анализ данных о состоянии направлений движения ТС через перекрёсток и скопления пешеходов. Пять входных лингвистических переменных формализует информацию о состоянии загруженности различных направлений движения и количестве ожидающих проход пешеходов. Каждая лингвистическая переменная описывается перечнем из трёх термов вида [high; medium; low] с набором из  $z$ - и  $s$ -образных функций принадлежности на краях области определения и треугольной в средней части этого диапазона. Выходными параметрами регулятора являются сигналы весовых коэффициентов, которые используются для формирования управляющих воздействий, варьирующих длительность фаз, и содержат аналогичный набор термов и три функции принадлежности треугольной формы. База знаний нечёткого логического регулятора содержит перечень из 21 правила продукций.

Фрагмент продукционной базы правил имеет следующий вид:

1. *If (Direction1 is high) and (Direction3 is high) then (TrafficControl1 is high);*
2. *If (Direction2 is low) and (Direction4 is low) then (TrafficControl2 is low);*
3. *If (PPL is average) then (TrafficControl3 is medium);*

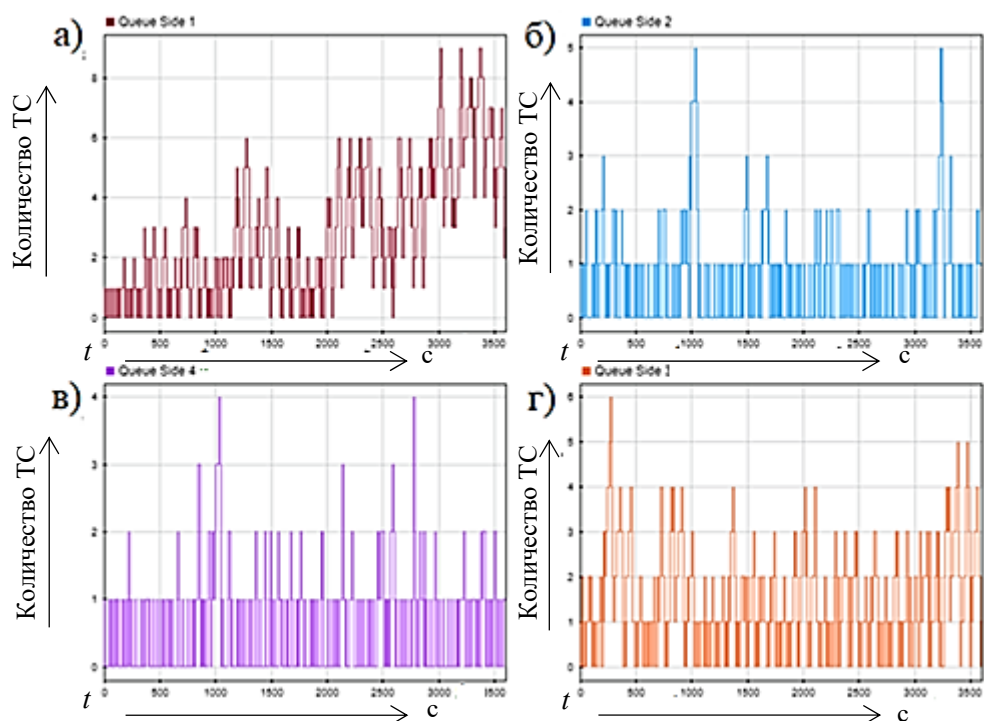
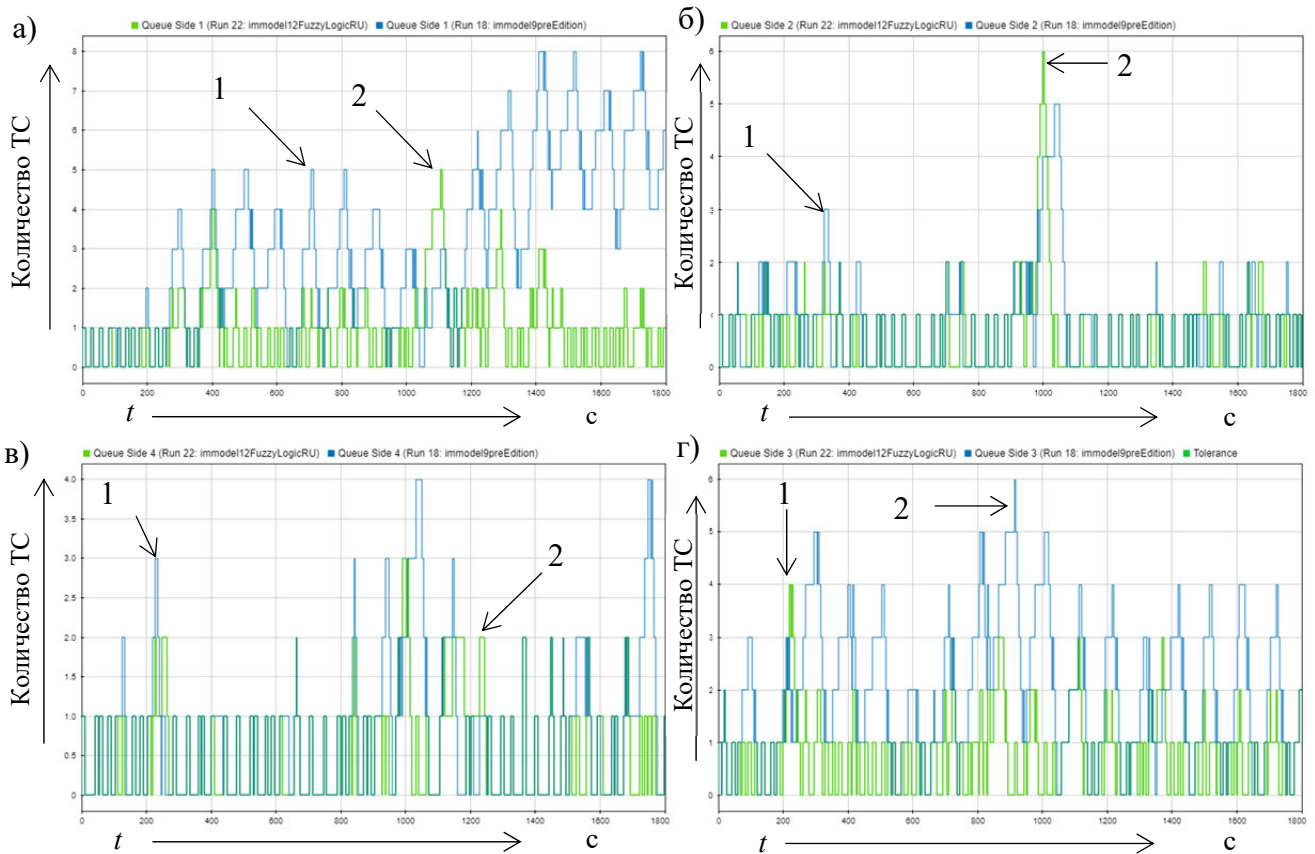


Рис. 6. Графики загрузки перекрёстка по направлениям при интеллектуальном управлении

Анализируя результаты моделирования (см. рис. 6), отображающего графики загрузки перекрёстка по направлениям при использовании трёхфазной схемы регулирования дорожного трафика, можно увидеть, что с учётом равных условий генерации объектов количество ТС по направлениям при применении нечёткого логического регулятора значительно снизилось по сравнению с использованием алгоритмов классического светофорного регулирования. Анализ загрузки перекрёстков с различной реализацией алгоритмов управления представлен на рис. 7.

На рис. 7 представлены графики сравнения пропускной способности перекрёстка при классическом и интеллектуальном управлении. Исходя из сравнительной характеристики видно, что при учёте равных условий генерации объектов система с использованием интеллектуального подхода позволяет оптимизировать пропускную способность перекрёстка.





1 – система с классическим регулированием; 2 – система с интеллектуальным управлением  
 Рис. 7. Графики сравнения пропускной способности перекрёстка при классическом и интеллектуальном управлении

**Заключение.** Таким образом, настройка нечёткой системы управления под параметры конкретного объекта и использование экспертной системы анализа данных позволяют применять интеллектуальное управление светофорными системами с целью оптимизации трафика и повышения эффективности дорожного движения. Использование интеллектуальных алгоритмов при организации системы управления позволяет адаптировать регулирование светофоров и гибко варьировать трафик на перекрёстках в реальном масштабе времени с учётом актуальных данных о загруженности и потоке пешеходов. Рассмотренная система управления, реализованная на основе нечёткого логического регулятора, способствует более эффективному распределению пропускной способности и снижению загруженности транспортной сети, что может иметь положительное влияние на поток транспорта и безопасность движения.

Предложенный подход в дальнейшем может быть эффективным при разработке распределённой системы управления транспортной сетью города, особенно в местах повышенной плотности трафика. Применение такой системы управления на перекрёстках обеспечит более эффективную организацию движения транспортных потоков, а также увеличит общую пропускную способность дорожной сети. Дальнейшее развитие предложенного подхода может быть направлено на расширение количества смежных перекрёстков под управлением нечётких систем и их интеграцию в единую интеллектуальную систему, построенную по иерархическому принципу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2 (55). – С. 32-39.



2. Xiaokan Wang, Qiong Wang Fuzzy control strategy for a compound energy system for an urban rail train based on the required power // Measurement. 2020. № 163. 107888.
3. Cherny S. P., Savelyev D. O., Savelyeva A. S., Bazhenov R. I., Povkh I. V. Simulation of a discrete event system for process control of robotic casting // Journal of Physics: Conference Series. Сер. «International Conference on IT in Business and Industry, ITBI 2021» 2021. p. 012080.
4. Черный, С. П. Разработка интеллектуальной системы управления электроприводом якорной лебёдки / С. П. Черный, А. В. Бузикаева, А. К. Тимофеев // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 4-1 (54). – С. 195-200.
5. V. A. Soloviev, N. E. Deryuzhkova, and V. V. Teterin, «Fuzzy control in the control system of positional electric drives of a rod installation», Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region, 2019. № 5. P. 77-80.
6. Стабилизация напряжения статическим тиристорным компенсатором с нечётким регулятором в системе с переменной нагрузкой / А. В. Купова, В. А. Соловьев, А. А. Светлаков, В. А. Челухин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII (55). – С. 48-57.
7. Seyed Mohammad Mehdi Abbasi, Aliakbar Jalali Fuzzy tracking control of fuzzy linear dynamical systems // ISA Transactions 97. 2020. P. 102-115.
8. Popova V. S., Soloviev V. A. Applying computational algorithms to determine the probabilistic range of fuzzy identifier membership functions for the ice prediction module // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. P. 9271189.
9. Jiage Huoa, Felix T.S. Chana, Carman K.M. Leea, Jan Ola Strandhagenb, Ben Niuc Smart control of the assembly process with a fuzzy control system in the context of Industry 4.0 // Advanced Engineering Informatics. 2020. № 43. P. 101031.
10. Исследование особенностей применения метода функциональной декомпозиции при разработке имитационных моделей цифрового двойника роботизированного процесса / М. А. Горькавый, В. П. Егорова, А. И. Горькавый, М. А. Мельниченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III (59). – С. 27-34.