

Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики

М. В. Бобырь¹ ✉, Н. И. Храпова¹, М. А. Ламонов¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка системы управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики с возможностью корректировки временных интервалов сигналов светофора в зависимости от дорожной ситуации.

Методы. Определение входных переменных для нечеткой логической системы управления интеллектуальным светофором выполняется с помощью системы технического зрения. Предложенный способ управления устройством регулирования дорожным движением основан на системе нечеткого вывода и содержит несколько этапов: определение четких входных переменных, фаззификация значений входных переменных, агрегирование данных на основе нечетких правил, дефаззификация значений и определение времени задержки разрешающего сигнала светофора.

Результаты. По предложенной нечеткой модели разработано устройство, имитирующее работу системы управления интеллектуальным светофором. Устройство собрано на базе контроллера Arduino Uno. Создана специализированная программная модель, которая была запатентована. Номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для регулирования светофора на основе нечеткой логики» – 2021661796.

Заключение. Результаты экспериментальных исследований показали высокую эффективность работы интеллектуального светофора в суточном цикле. Программа успешно справляется с оценкой плотности потока автомобилей и пешеходов, пропорционально регулируя время работы ламп светофора. Доказано, что внедрение разработанной системы управления интеллектуальным светофором позволяет обеспечить безопасность и удобство дорожного движения для всех участников.

Ключевые слова: нечеткая логика, нечеткая система вывода, система управления интеллектуальным светофором.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Бобырь М. В., Храпова Н. И., Ламонов М. А. Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 162-176. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>.

Поступила в редакцию 23.09.2021

Подписана в печать 08.10.2021

Опубликована 20.12.2021

Smart Traffic Light Control System Based on Fuzzy Logic

Maxim V. Bobyr ¹ ✉, Natalia I. Khrapova ¹, Maxim A. Lamonov ¹

² Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a smart traffic light control system based on fuzzy logic with the ability to adjust the time intervals of traffic light signals depending on the traffic situation.

Methods. The definition of input variables for a fuzzy logic control system of smart traffic lights is performed using a vision system. The proposed method of controlling a traffic control device is based on a fuzzy inference system and contains several stages: determination of clear input variables, fuzzification of the values of input variables, aggregation of data based on fuzzy rules, defuzzification of values and determination of the delay time of the permitting traffic light signal.

Results. According to the proposed fuzzy model, a device that simulates the operation of a smart traffic light control system was developed. The device is assembled on the basis of the Arduino Uno controller. The developed specialized software model was patented. The number of the certificate of state registration of the computer program "Software for traffic light control based on fuzzy logic" is 2021661796.

Conclusion. The results of experimental studies show the high efficiency of the smart traffic lights in a daily cycle. The program successfully copes with the assessment of the traffic density of cars and pedestrians, adjusting the operating time of traffic lights proportionally. It is proved that the implementation of the developed smart traffic light control system makes it possible to ensure the safety and convenience of road traffic for all road users.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy output system, intelligent traffic light control system.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Bobyr M.V., Khrapova N. I., Lamonov M. A. Smart Traffic Light Control System Based on Fuzzy Logic. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 162-176 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-162-176>.

Received 23.09.2021

Accepted 08.10.2021

Published 20.12.2021

Введение

Светофор – оптическое устройство, подающее световые сигналы для регулирования движения всех видов транспорта и пешеходов. За годы своего существования устройство претерпело множество изменений, однако цвета сигналов предшественника используются и в современных моделях¹ [1].

Большинство светофоров работают по фиксированному циклу, при котором каждая фаза регулирования повторяется через определенный промежуток времени. Этот стиль работы прост, однако он оказывается неэффективным при интенсивном движении. Более совершенной альтернативой является разработка интеллектуального светофора на основе нечеткой логики [2].

Прототип интеллектуального светофора появился в конце 1920 годов. На перекрестке был установлен детектор

¹ ГОСТ Р 50597-93. Автомобильные дороги и улицы требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. М., 1993.

для получения данных о дорожном движении [3,4]. Полученная информация передавалась на светофор, который загорался «красным» светом только в том случае, когда на второстепенной дороге приближался автомобиль.

Приложения с нечеткой логикой для управления светофорами используются с 1970 годов. Преимуществом нечеткой логики является ее способность моделировать процесс принятия решения человеком и выдавать приближенные решения в случаях, когда описание математическими методами невозможно [5-8].

В работе [9] целью исследования являлась разработка системы интеллектуального контроллера для управления светофором. Был проведен сравнительный анализ работы обычного светофора и разработанного устройства. В ходе эксперимента ученые выяснили, что контроллер с нечеткой логикой успешно адаптируется в соответствии с плотностью движения и значительно сокращает время ожидания разрешающего сигнала. Недостатки работы [9] заключаются в том, что для каждой составляющей цвета «Green, Red, Orange» создана отдельная база нечетких правил, что увеличивает время работы нечеткой системы. Кроме того для всех светофоров предусмотрены индивидуальные микроконтроллеры, что также приводит к снижению производительности вычислительной системы. В работе [10] исследования направлены на получение

минимального времени ожидания зеленого сигнала. Параметры нечеткого регулятора определялись с помощью алгоритма обучения с подкреплением. Однако для подобного вида обучения необходимо время и это снижает эффективность работы данной системы. В работе [11] эксперименты проводились для нескольких вариантов транспортных развязок. На определенном расстоянии были установлены детекторы для получения информации о транспортном потоке. Входными данными являлась максимальная длина пробки в соответствующем направлении. Недостатком работы [11] являются нечеткие правила, созданные для каждой составляющей цвета, что увеличивает их количество и снижает производительность системы.

Предложенная нами модель интеллектуального светофора следит за плотностью транспортного и пешеходного потока и подстраивается под дорожную ситуацию. Учитывая введенное значение количества машин и людей на перекрестке, программа варьирует значение времени на каждую фазу мигания ламп интеллектуального светофора, благодаря чему длительность зеленого сигнала увеличивается на наиболее загруженном направлении.

Внедрение таких систем на улицах городов решает основные транспортные проблемы, такие как пробки, аварийность, повышает безопасность дорожного движения, а также увеличивает среднюю скорость городского потока.

Материалы и методы

Разработанная нечеткая логическая система управления интеллектуальным светофором предусмотрена для перекрестка с пешеходным переходом [12-14]. В системе имеются две входные переменные: количество автомобилей и количество пешеходов, которые опре-

деляются с помощью системы технического зрения [15]. Нечеткой выходной переменной является время, на которое необходимо увеличить продолжительность работы разрешающего сигнала светофора.

На рис. 1 представлена схема перекрестка с применением интеллектуальных светофоров.

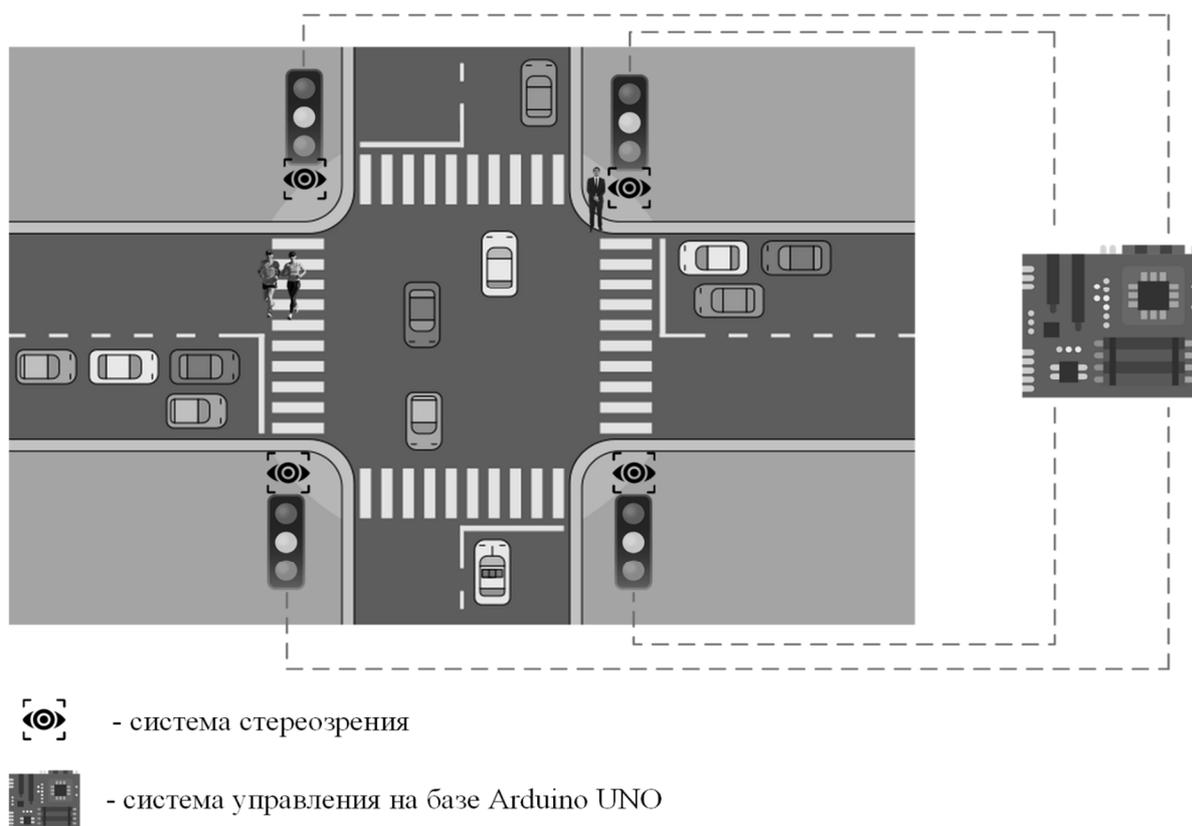


Рис. 1. Схема перекрёстка с применением интеллектуальных светофоров

Fig. 1. The diagram of the intersection with smart traffic lights

Процесс управления транспортным потоком разделен на шаги, соответствующие одному циклу программы. Каждый шаг включает в себя следующие этапы:

1. Определение четких входных переменных.
2. Фазификация значений входных переменных.

3. Выборка решений на основе лингвистических переменных и ряда нечетких правил¹.

4. Дефазификация значений [16-18].

¹ Спицын В.Г. Разработка экспертных систем на основе нечетких правил вывода: методические указания к лабораторным работам. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. С 33.

5. Определение времени задержки разрешающего сигнала светофора.

Рассмотрим математическую модель нечеткой логической системы управления интеллектуальным светофором.

Шаг 1. Построение функций принадлежности нечеткой системы и расчет степеней функции принадлежности. Расчет выполняется по формуле.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \notin [a; c]; \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{если } x \in [a; b]; \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{если } x \in [b; c], \end{cases} \quad (1)$$

где $\mu(x)$ – характеристическая функция принадлежности; a, b, c – вершины соответствующего треугольника (рис. 2).

Шаг 2. Расчет степеней истинности предпосылок нечетких правил происходит с учетом базы нечетких правил (табл. 1) и по формуле (2).

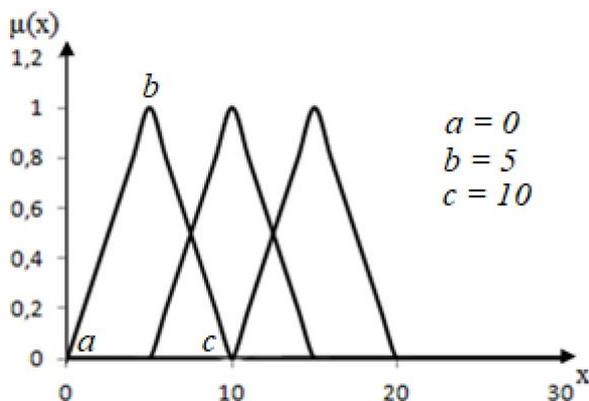


Рис. 2. График функции принадлежности входной переменной

Fig. 2. Graph of the membership function of the input variable

Таблица 1. База нечетких правил

Table 1. Fuzzy rule base

	B_1	B_2	B_3
A_1	Y_3	Y_4	Y_5
A_2	Y_4	Y_3	Y_4
A_3	Y_1	Y_2	Y_3

Расчет 9 степеней истинности осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} R1 &= \theta_t(A_1; B_1) - \text{для } Y_3; \\ R2 &= \theta_t(A_1; B_2) - \text{для } Y_4; \\ R3 &= \theta_t(A_1; B_3) - \text{для } Y_5; \\ R4 &= \theta_t(A_2; B_1) - \text{для } Y_2; \\ R5 &= \theta_t(A_2; B_2) - \text{для } Y_3; \\ R6 &= \theta_t(A_2; B_3) - \text{для } Y_4; \\ R7 &= \theta_t(A_3; B_1) - \text{для } Y_1; \\ R8 &= \theta_t(A_3; B_2) - \text{для } Y_2; \\ R9 &= \theta_t(A_3; B_3) - \text{для } Y_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где θ_t – знак, обозначающий операцию нечеткой импликации с использованием одной из t-норм [19].

Шаг 3. Усечение функций принадлежности в зависимости от нечетких правил. Расчет выполняется по формуле:

$$\begin{aligned} Y_5 &= R_3; \\ Y_4 &= \theta_s(R_2; R_6); \\ Y_3 &= \theta_s(R_1; \max(R_5; R_9)); \\ Y_2 &= \theta_s(R_8; R_4); \\ Y_1 &= R_7, \end{aligned} \quad (3)$$

где θ_s – знак, обозначающий операцию нечеткой импликации с использованием одной из s-норм [19].

Шаг 4. Метки и дефаззификация. Вычисление значения дефаззификации четкого значения выполняется по методу упрощенного центра тяжести [20].

Пусть метки выходной функции принадлежности задаются синглтонной функцией принадлежности и равны $M_1=2000$, $M_2=3000$, $M_3=4000$, $M_4=5000$, $M_5=6000$ (рис. 4).

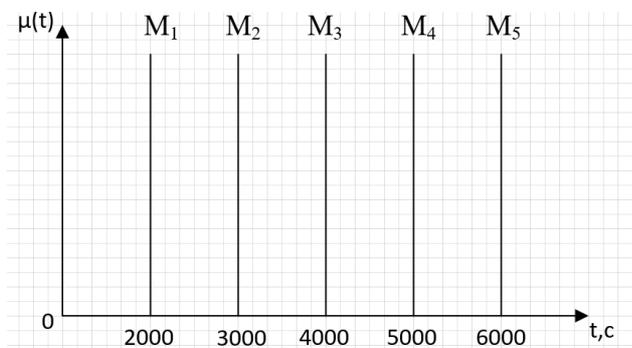


Рис. 3. Метки выходной функции принадлежности

Fig. 3. Labels of the output membership function

Дефазификация выходной переменной осуществляется на основе формулы:

$$t_{\text{delay}} = \frac{\sum_{i=1}^{11} M_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^{11} Y_i}, \tag{4}$$

где M_i – метки выходной функции принадлежности.

Шаг 5. Время регулирования сигналов интеллектуального светофора (формула (5)):

$$t_{\text{per}} = t_{\text{уст}} + t_{\text{delay}}, \tag{5}$$

где $t_{\text{уст}} = 10$ с.

Для реализации устройства интеллектуального светофора использовались микроконтроллер Arduino Uno, кабель USB, макетная плата, провода, резисторы, светодиоды красного, зеленого и желтого цветов [21-23].

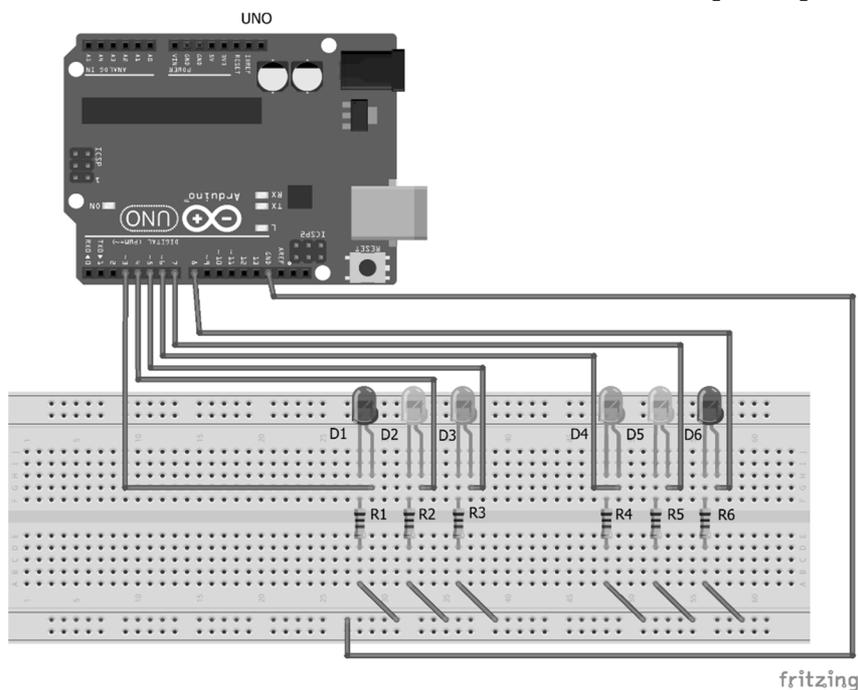


Рис. 4. Схема устройства интеллектуального светофора, где **UNO** – микроконтроллер Arduino UNO; **D1, D6** – красные светодиоды; **D2, D5** – желтые светодиоды; **D3, D4** – зеленые светодиоды; **R1-6** – резисторы номиналом 220 Ом

Fig. 4. Structure diagram of the smart traffic light, where **UNO** is the microcontroller Arduino UNO; **D1, D6** are red LEDs; **D2, D5** are yellow LEDs; **D3, D4** are green LEDs; **R1-6** are 220 Ohm resistors

Схема подключения светодиодов к Arduino Uno, имитирующих работу ламп светофора, представлена на рис. 5.

Светодиоды подключаются от управляющих сигналов микроконтроллера через резисторы к земле. Резистор используется в качестве токоограничения. Так как напряжение с выходов 3-4 Arduino Uno (рис. 5) составляет 5В и ток, при котором горят светодиоды, равен 20-40 мА, то по закону Ома сопротивление на схеме должно находиться в диапазоне от 150 Ом до 250 Ом. Выбираем стандартное сопротивление $R=220\text{Ом}$ и используем его в схеме. Подключение выходных сигналов с микроконтроллера приведено в табл. 1.

Общая схема работы интеллектуального светофора состоит из 2 основных и 2 промежуточных режимов регулирования. Первый режим предполагает, что на светофоре 1 горит лампа красного света, а на светофоре 2 – зеленый свет. Второй режим является промежуточным перед сменой сигналов устройства. При этом к лампам, горящим в режиме 1, добавляется мигающий желтый свет. Происходит пять ко-

ротких включений сигнала жёлтого цвета, после чего устройства переходят в 3 режим. Режим 3 полностью противоположен режиму 1. В 4 режиме происходит переход на режим 1, после чего цикл возобновляется.

Схема работы светофора сведена в табл. 2.

На рис. 6 приведены примеры работы режимов 1-4 на макете «Интеллектуальный светофор».

Результаты моделирования работы устройства интеллектуального светофора представлены в разделе «Результаты и их обсуждение».

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты моделирования системы управления интеллектуальным светофором на приведенном ниже примере.

Пусть на перекрестке находятся 11 машин ($\text{car} = 11$) и 9 пешеходов ($\text{pedestrian} = 9$). Выполним расчеты для введенных данных.

Рассмотрим функции принадлежности нечеткой системы для автомобилей и пешеходов:

Таблица 2. Подключение выходных сигналов

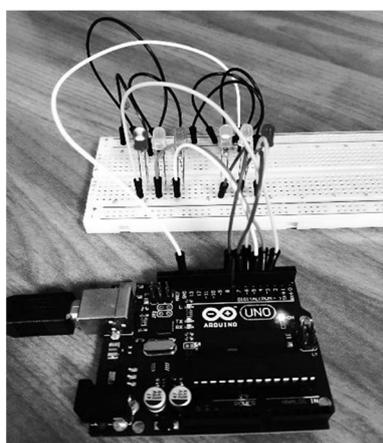
Table 2. Connection of output signals

Обозначение светодиода / Light-emitting diode	Светофор 1 / Traffic lights 1			Светофор 2 / Traffic lights 2		
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Цвет / Colour	красный	желтый	зеленый	зеленый	желтый	красный

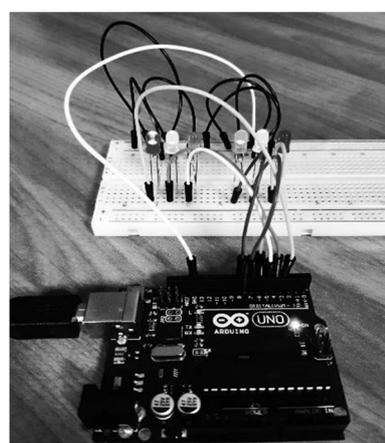
Таблица 3. Схема работы светофора

Table 3. Traffic light operation scheme

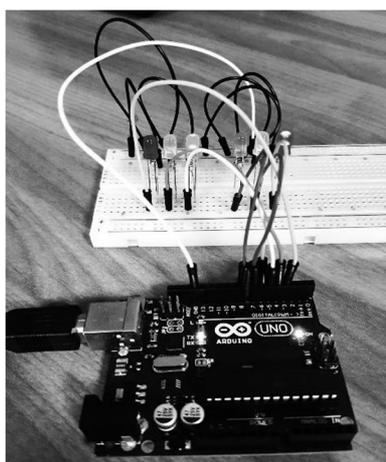
Подключение / Connection	Светофор 1 / Traffic lights 1			Светофор 2 / Traffic lights 2		
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Режимы / Modes	красный / red	желтый / yellow	зеленый / green	зеленый / green	желтый / yellow	красный / red
1 режим / mode 1	1	0	0	1	0	0
2 режим / mode 2	1	1/0 10 тактов	0	1	1/0 10 тактов	0
3 режим / mode 3	0	0	1	0	0	1
4 режим / mode 4	0	1/0 10 тактов	1	0	1/0 10 тактов	1



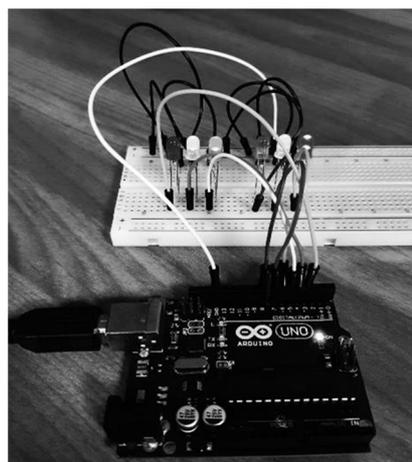
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Режимы работы светофоров: **а** – первый режим; **б** – второй режим; **в** – третий режим; **г** – четвертый режим

Fig. 5. Traffic light operating modes: **a** – the first mode; **b** – the second mode; **v** – the third mode; **г** – the fourth mode

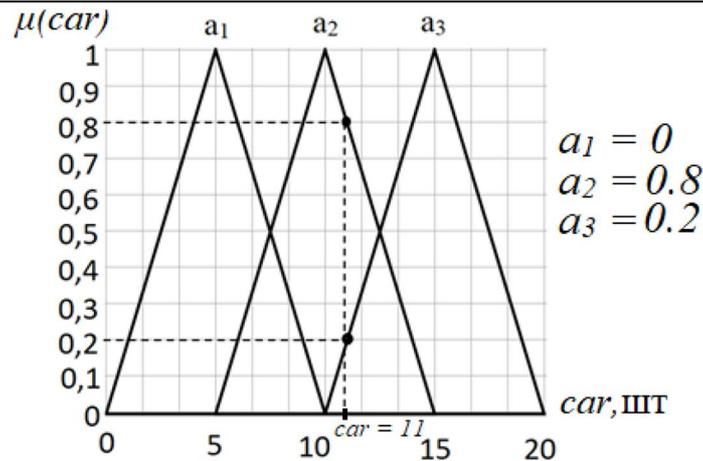


Рис. 6. График функции принадлежности входной и выходной переменной «Автомобили»

Fig. 6. Diagram of the membership function of the input and output variable "Cars"

Рассчитаем степени принадлежности нечеткого множества для введенного значения автомобилей и пешеходов по формуле (1). Полученные значения приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

Рассчитаем степени истинности предпосылок нечетких правил с учетом формулы (2):

$$R1 = \theta_t(0; 0,2) = 0 \text{ – для } Y_3 ;$$

$$R2 = \theta_t(0; 0,8) = 0 \text{ – для } Y_4 ;$$

$$R3 = \theta_t(0; 0) = 0 \text{ – для } Y_5 ;$$

$$R4 = \theta_t(0,8; 0,2) = 0,2 \text{ – для } Y_2 ;$$

$$R5 = \theta_t(0,8; 0,8) = 0,8 \text{ – для } Y_3 ;$$

$$R6 = \theta_t(0,8; 0) = 0 \text{ – для } Y_4 ;$$

$$R7 = \theta_t(0,2; 0,2) = 0,2 \text{ – для } Y_1 ;$$

$$R8 = \theta_t(0,2; 0,8) = 0,2 \text{ – для } Y_2 ;$$

$$R9 = \theta_t(0,2; 0) = 0 \text{ – для } Y_3 .$$

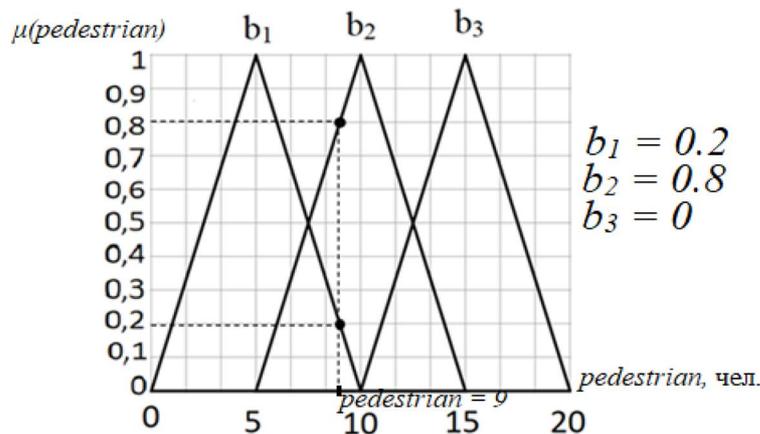


Рис. 7. График функции принадлежности входной и выходной переменной «Пешеходы»

Fig. 7. Diagram of the membership function of the input and output variable "Pedestrians"

Выполним усечение функций принадлежности в зависимости от нечетких правил по формуле (3):

$$Y_5 = R_3 = 0 ;$$

$$Y_4 = \theta_s(0; 0) = 0 ;$$

$$Y_3 = \theta_s(0; 0,8; 0) = 0,8 ;$$

$$Y_2 = \theta_s(0,2; 0,2) = 0,2 ;$$

$$Y_1 = R_7 = 0,2 .$$

Выполним расчет дефаззификации по формуле (4):

$$t_{\text{delay}} = \frac{(Y_1 * M_1) + (Y_2 * M_2) + (Y_3 * M_3) + (Y_4 * M_4) + (Y_5 * M_5)}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5} =$$

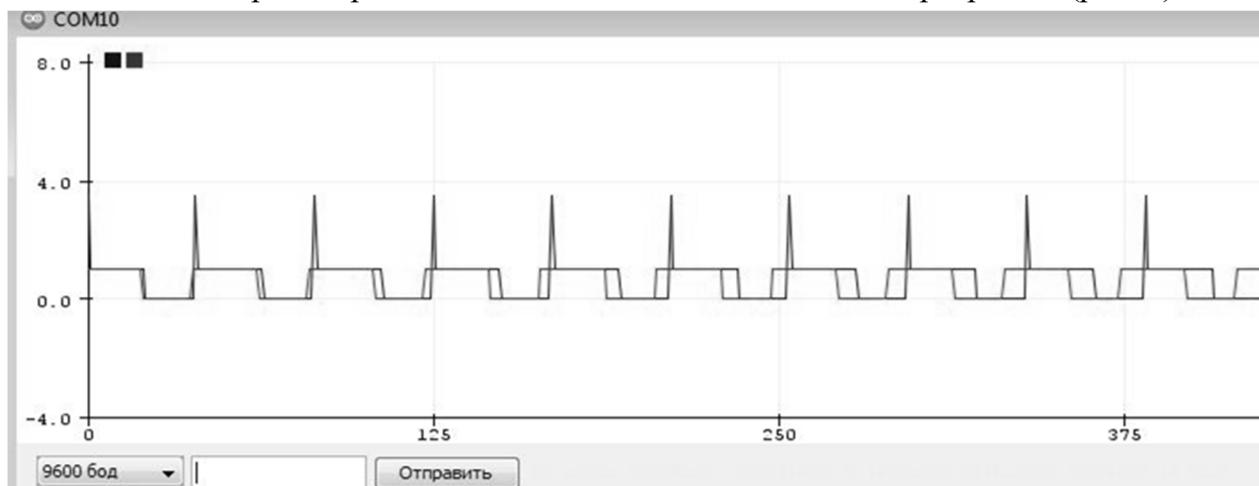
$$= \frac{(0,2 * 2000) + (0,2 * 3000) + (0,8 * 4000) + (0 * 5000) + (0 * 6000)}{0,2 + 0,2 + 0,8 + 0 + 0} = 3,5 \text{ сек.}$$

Выполним расчет времени регулирования сигналов интеллектуального светофора по формуле (5):

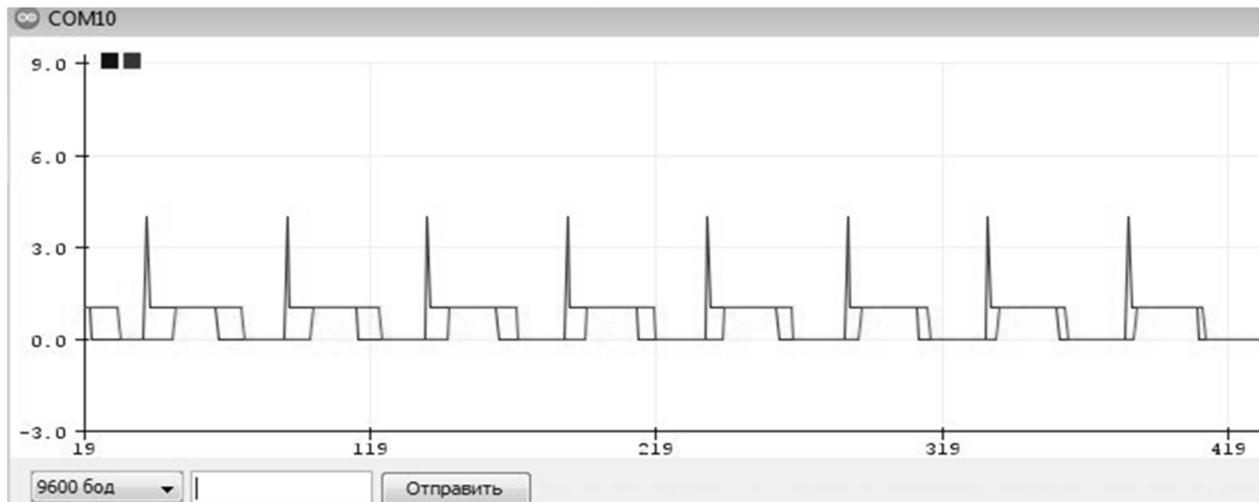
$$t_{\text{рег}} = 10 + 3,5 = 13,5 \text{ сек.}$$

Было проведено 4 экспериментальных моделирования, в которых менялись значения транспортного и пеше-

ходного потока. Моделирование проводилось с помощью функции Serial Plotter в Arduino IDE. Полученные диаграммы показывают время задержки сигналов светофора в зависимости от данных о количестве автомобилей и пешеходов на перекрестке (рис. 8).



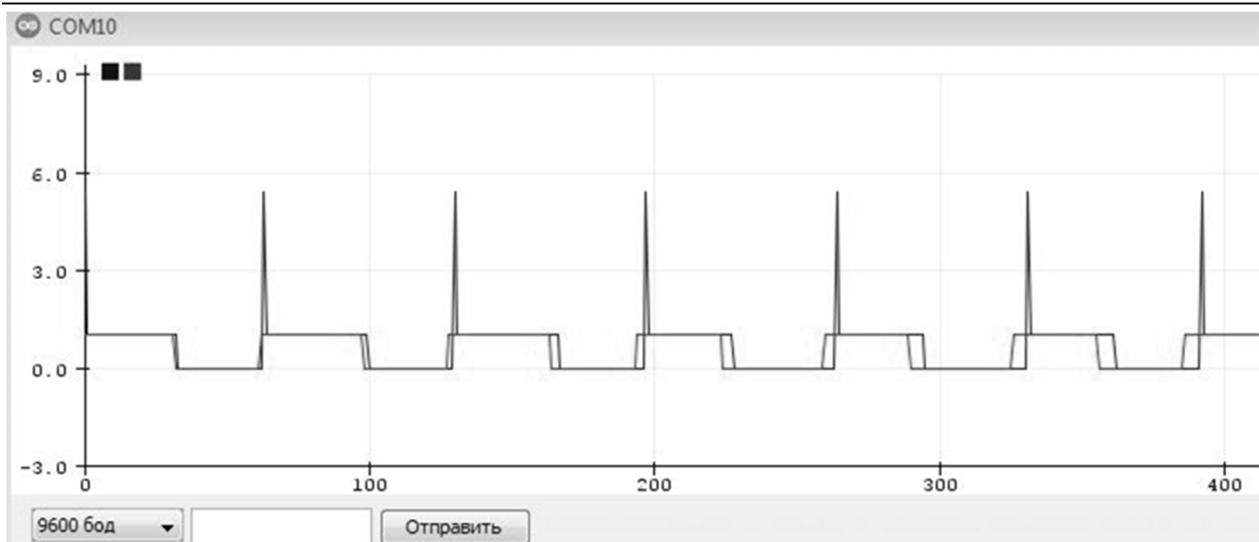
а)



б)

Рис. 8. Диаграммы изменения времени задержки сигналов светофора в зависимости от количества автомобилей и пешеходов на перекрестке: **а** – car = 11, pedestrian = 9; **б** – car = 1, pedestrian = 1 (окончание на с. 172)

Fig. 8. Diagrams of changes of traffic light signals delay time according to the number of cars and pedestrians at the crossroad, where **а** – car = 11, pedestrian = 9; **б** – car = 1, pedestrian = 1; (ending at p. 172)



в)



г)

Рис. 8. Диаграммы изменения времени задержки сигналов светофора в зависимости от количества автомобилей и пешеходов на перекрестке: **в** – car = 5, pedestrian = 12; **г** – car = 7, pedestrian = 3 (начало с. 171)

Fig. 8. Diagrams of changes of traffic light signals delay time according to the number of cars and pedestrians at the crossroad, where **в** – car = 5, pedestrian = 12; **г** – car = 7, pedestrian = 33 (beginning at 171 p.)

Моделирование диаграммы (а) проводилось для ситуации, когда на перекрестке находятся 11 машин и 9 пешеходов. Время задержки сигналов светофора при этом равно 3,5 сек. Диаграмма (б) отражает ситуацию, когда на перекрестке находится 1 пешеход и 1 автомо-

биль. Время задержки сигнала – 4 сек. Диаграмма (в) смоделирована для значений 5-12, время задержки – 5,4 сек. Моделирование диаграммы (г) проводилось для 7 машин и 3 пешеходов. Время задержки сигналов светофора равно 3,6 сек.

Проведенные экспериментальные исследования доказывают высокую эффективность работы интеллектуального светофора в суточном режиме. Программа успешно справилась с оценкой плотности пешеходного и транспортного потоков и регулированием времени задержки сигналов интеллектуального светофора.

Выводы

В представленной работе разработана система управления интеллектуальным светофором, в которую адаптирована модель нечеткой логической системы для автоматизации корректировки временных интервалов световых сигналов светофора в зависимости от интенсивности транспортного и пешеходного потоков.

Список литературы

1. Яковенко Н.Ю., Ясенюк С.Н., Нежелченко Е.В. Управление транспортными потоками. Белгород: Изд-во БелГАУ им. В.Я. Горина, 2020. 82 с.
2. Бобырь М.В., Милостная Н.А. Анализ использования мягких арифметических операций в структуре нечетко-логического вывода // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 7 (133). С. 7-15.
3. Бачманов М.Д. Опыт применения современных детекторов транспорта в задачах управления транспортным потоком // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура: журнал электронный. 2014. №2(2) декабрь.
4. Евстигнеев И.А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах федерального значения России. М.: изд-во «Перо», 2016. 260 с.
5. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Моделирование процесса управления температурным режимом в зоне резания на основе нечеткой логики // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 3. С. 76-82.
6. Киселёва Э.А., Краева А.А., Савинова Ю.С. Обзор нечеткой логики в управлении // Integral: Международный журнал прикладных наук и технологий. 2019. Т. 3
7. Bobyry M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2020, 152, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>
8. Bobyry M.V., Emelyanov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // Applied Soft Computing. 2020. Т. 88. С. 106030.
9. Cihan Karakuzu, Osman Demirci, Fuzzy logic based smart traffic light simulator design and hardware Implementation // Applied Soft Computing. 2010. № 10. P. 66–73.
10. Ella Bingham. Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control // European Journal of Operational Research. 2001. №131. P. 232–241.
11. C.-H. Chou, J.-C. Teng, A fuzzy logic controller for traffic junction signals // Information Sciences. 2002. №143. P. 73–97.

12. Титов В.С., Бобырь М.В., Милостная Н.А. АСУ прогнозированием точности обработки деталей // Автоматизация в промышленности. 2008. № 4. С. 3-4.
13. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. Смоленск: СФРУК, 2013. 153 с.
14. Патент на полезную модель RU 27868 U1. Система автоматического управления следящими приводами оборудования с ЧПУ. 20.02.2003. Заявка № 2001129226/20 от 29.10.2001 / Титов В.С., Беседин А.В., Бобырь М.В.
15. Гридин В.Н., Титов В.С., Труфанов М.И. Адаптивные системы технического зрения. М.: Наука, 2009.
16. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Математическая модель для нового метода Дефаззификации в структуре нечеткого вывода // Мехатроника, автоматика и робототехника: сборник научных трудов международной научно-практической конференции. Новокузнецк, 2018. С. 218-220.
17. Бобырь М.В., С.А. Кулабухов Дефаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. №9. С.32– 41.
18. Leekwijck W.V., Kerre E.E. Defuzzification: criteria and classification // Fuzzy Sets Syst. 1999. № 108. P. 159–178.
19. Piegat A. Fuzzy modelling and control. Physica-Verlag. Heidelberg. 2001. doi:10.1007/978-3-7908-1824-6
20. Vuong, P. T., Madni, A. M., Vuong, J. B. VHDL implementation for a fuzzy logic controller. In 2006 World Automation Congress, WAC'06. IEEE Computer Society (2006)
21. Arduino.ru: Официальный сайт Arduino в России [Электронный ресурс]. Загл. с экрана. URL: <http://arduino.ru/>, свободный.
22. Collotta M., Bello L.L., Pau G. A novel approach for dynamic traffic lights management based on Wireless Sensor Networks and multiple fuzzy logic controllers. Elsevier: Expert Systems with Applications. March 2015. P. 5403- 5415.
24. Olanrewaju O. M, Obiniyi A.A., Junaidy S. B. Fuzzy Logic Concept For Safety Driven Vehicle Pedestrian Traffic Interaction // International Journal of Computer Application (0995-8887). June 2017. Vol. 167. №1.

References

1. Yakovenko N.Y., Yasenok S.N., Nezhelchenko E.V. *Upravlenie transportnymi potokami* [Traffic flow management]. Belgorod, 2020. 82 p.
2. Bobyr M.V., Milostnaya N.A. Analiz ispol'zovaniya myagkikh arifmeticheskikh operatsii v strukture nechetko-logicheskogo vyvoda [Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy logic inference]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 7 (133), pp. 7-15.

3. Bachmanov M.D. Opyt primeneniya sovremennykh detektorov transporta v zadachakh upravleniya transportnym potokom [The experience of using modern transport detectors in traffic flow control tasks]. *Zhurnal elektronnyi. «Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura» = Electronic journal. The car. Road. Infrastructure*, 2014, no.2(2) December.

4. Evstigneev I.A. *Osnovy sozdaniya intellektual'nykh transportnykh sistem na avtomobil'nykh dorogakh federal'nogo znacheniya Rossii* [Fundamentals of creating intelligent transport systems on highways of federal significance of Russia]. Moscow, Pero Publ., 2016, 260 p.

5. Bobyry M.V., Kulabukhov S.A. Modelirovanie protsessa upravleniya temperaturnym rezhimom v zone rezaniya na osnove nechetkoi logiki [Modeling of the process of controlling the temperature regime in the cutting zone based on fuzzy logic]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*, 2017, no. 3, pp. 76-82/

6. Kiseleva E.A., Kraeva.A., Savinova Y.S. Obzor nechetkoi logiki v upravlenii [Review of fuzzy logic in management]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologii «Integral» = International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral"*, 2019, vol. 3.

7. Bobyry M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of a CNC machine, implemented on FPGA. *Measurement: Journal of the International Confederation of Measurements*, 2020, 152, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>

8. Bobyry M.V., Emelyanov S.G. Nonlinear method of training neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied soft computing*, 2020, vol. 88, pp. 106030.

9. Chihan Karakuzu, Osman Demirci. Development and hardware implementation of an intelligent traffic light simulator based on fuzzy logic. *Applied soft computing* 2010, no. 10, pp. 66-73.

10. Ella Bingham, Reinforcement learning in the management of neurofusion traffic signals. *European Journal of Operational Research*, 2001, no. 131, pp. 232-241.

11. Chou C.-H., Teng J.-S. Fuzzy logic controller for traffic interchange signals. *Information Sciences*, 2002, no. 143, pp. 73-97.

12. Titov V.S., Bobyry M.V., Milostnaya N.A. ASU prognozirovaniem tochnosti obrabotki detalei [Automated control system predicting the accuracy of machining parts]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*, 2008, no. 4, pp. 3-4.

13. Uskov A.A. *Sistemy s nechetkimi modelyami ob"ektov upravleniya* [Systems with fuzzy models of control objects]. Smolensk, SFRUK Publ., 2013. 153 p.

14. Titov V.S., Besedin A.V., Bobyry M.V. *Sistema avtomaticheskogo upravleniya sledyashchimi privodami oborudovaniya s ChPU* [Automatic control system for tracking drives of CNC equipment]. Patent for utility model RU 27868 U1, 02/20/2003. Application No. 2001129226/20 dated 29.10.2001.

15. Gridin V.N., Titov V.S., Trufanov M.I. *Adaptivnye sistemy tekhnicheskogo zreniya* [Adaptive systems of technical vision]. Moscow, Nauka Publ., 2009.

16. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. [Mathematical model for a new method of Defuzzification in the structure of fuzzy inference]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Mechatronics, automation and robotics. Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference]. Novokuznetsk, 2018, pp. 218-220 (In Russ.).

17. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. Defazzifikatsiya vyvoda iz bazy nechetkikh pravil na osnove metoda raznosti ploshchadei [Defuzzification of inference from the base of fuzzy rules based on the area difference method]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2015, no.9, pp.32- 41.

18. Likviyk V.V., Kerre E.E. Defuzzification: criteria and classification. *The system of fuzzy sets*. 1999, no.108, pp. 159-178.

19. Piegat A. Fuzzy modeling and control. Physics-Verlag, Heidelberg, 2001, doi:10.1007/978-3-7908-1824-6

20. Vuong P.T., Madni A.M., Vuong J.B. Implementation of VHDL for fuzzy logic controller. In 2006, the World Congress on Automation, WAC'06. IEEE Computer Society (2006)

21. Arduino.ru : Official website of Arduino in Russia [Electronic resource]. Blank from the screen. Available at: <http://arduino.ru/>, free.

22. Collotta M., Bello L.L., Po G. A new approach to dynamic traffic light control based on wireless sensor networks and multiple fuzzy logic controllers. Elsevier: Expert Systems with Applications, pp.5403-5415, March 2015

23. Olanrevaju O. M., Obinii A. A., Junaidi S.B. "The concept of fuzzy logic for the interaction of pedestrians with safety-controlled vehicles". *International Journal of Computer Applications* (0995-8887), June 2017, vol. 167, no. 1.

Информация об авторах / Information about the Authors

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5400-6817>

Maxim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5400-6817>

Храпова Наталия Игоревна, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru

Natalia I. Khrapova, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: KhrapovaNI@yandex.ru

Ламонов Максим Александрович, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mtopdevice@gmail.com

Maxim A. Lamonov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mtopdevice@gmail.com