

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СЛОЖНОГО ПЕРЕКРЕСТКА В СРЕДЕ AnyLogic

Ю.И. Володина, julia_volodina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0936-0638>

Н.О. Сергеев, nikitosserg5@gmail.com

А.В. Затонский, z xenon@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Березниковский филиал, Березники, Россия*

Аннотация. Недостаточная пропускная способность улично-дорожной сети является проблемой большинства городов. Частично эта проблема может быть решена оптимизацией работы светофора. Поскольку подбор настроек светофора в реальном времени может привести к ухудшению дорожной ситуации, целесообразно предварительно настроить модель и на ней отработать различные режимы работы светофора, подобрать оптимальные. **Цель исследования:** моделирование изменения среднего числа машин в очереди перед запрещающим сигналом светофора и среднего времени проезда перекрёстка. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи: создание модели дорожного участка с реальными потоками на входах; определение среднего числа машин в очереди при различных режимах работы светофора; создание эксперимента для нахождения среднего времени левого поворота с вводом и без ввода специализированной левоповоротной фазы светофора. **Материалы и методы.** Для решения поставленных задач опробована методика использования среды AnyLogic для анализа участка дорожного движения, показана возможность применения имитационного моделирования с целью выявления зависимости пропускной способности перекрёстка от режима работы светофора. **Результаты.** В процессе исследования создана модель существующего перекрёстка и рассмотрена зависимость числа автомобилей в очереди перед запрещающим сигналом светофора от длительности его полного цикла. Для проведения эксперимента существующий цикл работы светофора длительностью 84 с был изменен до 30 с, 1, 2, 3 и 5 мин. Для визуализации полученных зависимостей построен график, отражающий число автомобилей в пробке при различных режимах работы светофора. Созданная модель использована также для определения зависимости времени проезда перекрёстка при левом повороте от числа поворачивающих машин и числа машин во встречном направлении. Рассмотрены варианты проезда светофора с дополнительным левым сигналом светофора и без него. Результаты представлены таблицей и графически. **Заключение.** Исследование показало, что при небольшом встречном трафике введение специализированной левоповоротной фазы светофора увеличивает время проезда перекрёстка, но при увеличении встречного трафика ситуация меняется на противоположную.

Ключевые слова: имитационное моделирование, перекресток, светофор, AnyLogic, очередь, пропускная способность дороги

Для цитирования: Володина Ю.И., Сергеев Н.О., Затонский А.В. Исследование возможности моделирования светофорного регулирования сложного перекрестка в среде AnyLogic // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 19–32. DOI: 10.14529/ctcr250202

STUDY OF THE POSSIBILITY OF TRAFFIC LIGHT CONTROL MODELING OF A COMPLEX INTERSECTION BY AnyLogic

Ju.I. Volodina, julia_volodina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0936-0638>

N.O. Sergeev, nikitosserg5@gmail.com

A.V. Zatonskiy, z xenon@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia

Abstract. Insufficient capacity of the road network is a problem in most cities. This problem can be partially solved by optimizing the operation of the traffic light. Since selecting traffic light settings in real time can lead to a deterioration in the traffic situation, it is advisable to pre-configure the model and work out various traffic light operating modes on it, and select the optimal ones. **The purpose of the study** was to simulate changes in the average number of cars in a queue before a traffic light and the average travel time of an intersection. To achieve this goal, the following tasks are formulated: creating a model of a road section with real flows at the entrances; determining the average number of cars in a queue under different traffic light operating modes; creating an experiment to find the average time of a left turn with and without the introduction of a specialized left-turn phase of the traffic light. **Materials and methods.** To solve the tasks set, the method of using the AnyLogic environment for analyzing a traffic section has been tested, and the possibility of using simulation modeling to identify the dependence of the intersection's capacity on the operating mode of the traffic light has been shown. **Results.** In the course of the research, a model of the existing intersection was created and the dependence of the number of cars in the queue in front of the forbidding traffic light signal on the duration of its full cycle was considered. To conduct the experiment, the existing 84-second traffic light cycle was changed to 30 seconds, one, two, three, and five minutes. To visualize the obtained dependencies, a graph is constructed that reflects the number of cars in a traffic jam under different traffic light operating modes. The created model is also used to determine the dependence of the travel time of an intersection at a left turn on the number of turning cars and the number of cars in the opposite direction. Traffic light options with and without an additional left signal are considered. The results are presented in a table and graphically. **Conclusion.** The study showed that with a small amount of oncoming traffic, the introduction of a specialized left-turn phase of the traffic light increases the travel time of the intersection, but with an increase in oncoming traffic, the situation changes to the opposite.

Keywords: queue modeling, intersection, traffic light, AnyLogic, queue, road capacity

For citation: Volodina Ju.I., Sergeev N.O., Zatonskiy A.V. Study of the possibility of traffic light control modeling of a complex intersection by AnyLogic. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):19–32. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250202

Введение

Количество автомобилей в городах растёт из года в год. По данным Росстата в Пермском крае число собственных легковых автомобилей на 1000 человек населения с 2010 до 2023 года выросло в 1,9 раза (с 187,9 в 2010 году до 361,7 в 2023 году)¹. В последующие годы прогнозируется дальнейший рост числа автомобилей, что приведёт к повышенной загруженности дорог в городах. Чтобы уменьшить очереди на перекрестках, которые возникают в часы пик и которые будут только увеличиваться, нужно строить новые дороги, расширять уже существующие, строить развязки, что требует больших финансовых вложений. Наиболее малозатратным способом уменьшения очередей и, соответственно, времени ожидания проезда является оптимизация работы светофоров. Для этой цели предложено использовать моделирование дорожного движения как достаточно действенный инструмент для анализа ситуации и принятия решений.

¹ Федеральная служба государственной статистики. Количество собственных легковых автомобилей на 1000 человек населения по субъектам Российской Федерации (с 2000 по 2022 год). Ответственный исполнитель: Трошина Е.И. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/>.

Сравнивая результаты аналитического расчета и имитационного моделирования дорожного движения, авторы в работе [1] делают вывод, что моделирование более точно описывает реальную транспортную систему. Авторы также отмечают, что построение модели более трудозатратно, тем не менее эти затраты окупаются возможностями моделирования и точностью результатов.

Сравнивая системы структурного и имитационного моделирования Stratum 2000, Simulink, AnyLogic, авторы работы [2] положительно оценивают достоверность моделирования всех трёх систем. Основным достоинством AnyLogic указывается «возможность работать с проектируемыми системами на разном уровне абстракции, а также проводить оптимизацию проектируемых систем».

При моделировании дорожного движения для большей достоверности модели приходится учитывать множество факторов, таких как состояние дороги, погодные условия, регион, состояние транспортных средств, наличие действующих систем контроля за транспортными средствами, человеческий фактор. «Основной классической проблемой для моделирования дорожного движения на улично-дорожной сети города является недостижимость предполагаемых результатов макромоделей вследствие отсутствия нужных данных, случайности выбора маршрутов водителями, неопределённости дорожного движения в условиях насыщенной сети» [3].

Поиск узких мест является важным при прогнозировании дорожного движения. К.Ф. Даганцо в работе [4] утверждает, что заторы на перекрестках можно уменьшить с помощью таких мер контроля, как измерение скорости, руководство маршрутом. Применяемые модели должны предсказывать то, что имеет значение, а именно поведение узких мест, динамику очереди.

Прогнозировать предзаторовые и заторовые ситуации, планировать мероприятия для повышения пропускной способности узкого места и всей дороги в целом можно, используя анализ транспортной диаграммы для конкретного участка дороги [5].

Авторы работы [6] отмечают, что при оптимизации работы светофора «целесообразно использовать имитационное моделирование, которое позволяет изучить и проанализировать все особенности организации движения транспорта на определенном участке дороги».

В работе [7] разработана имитационная модель двух последовательных перекрёстков, синхронизирована работа этих перекрёстков. В исследовании [8] реализована имитационная модель управления светофорами с использованием алгоритмов нечеткого логического вывода, а именно алгоритма Мамдани. Алгоритм оптимизации имитационной модели работы светофора предложен в работе [9].

В исследовании [10] авторами на практике подтверждена адекватность имитационной модели перекрёстка, созданной в среде AnyLogic, предприняты корректирующие действия.

В работах [11, 12] авторами произведено исследование конкретных участков дороги и произведено моделирование в программной среде AnyLogic, сделаны выводы об эффективности применения оптимизационного эксперимента.

Наиболее неудобным и аварийным при движении через перекрёсток является поворот налево через поток движущихся навстречу машин. Проблема решается вводом левоповоротной фазы светофора. Этот вопрос раскрыт в работах [13–15].

В работе [13] автор предложил модель, которая описывает задержку поворота из-за насыщения встречного потока при отсутствии левоповоротной фазы светофора. Пропускная способность полосы при этом уменьшается.

В статье [14] представлены результаты исследования методов ввода дополнительной левоповоротной фазы светофора, определены условия, при которых введение левоповоротной секции необходимо. Авторы говорят, что «введение специализированного левого поворота должно быть необходимым и оправданным, потому что для всего рассматриваемого транспортного потока увеличивается время ожидания разрешающего сигнала».

В работе [15] рассматривается изменение интенсивности движения левоповоротного потока в зависимости от длительности разрешающего сигнала светофора. Автор отмечает, что «в настоящее время интенсивность транспортных потоков в больших городах настолько увеличилась, что применение трехфазного регулирования становится необходимостью».

В перечисленных работах показано, что образование длинных очередей часто связано с конкретной работой светофоров. Грамотный расчет «зелёных фаз» светофоров, введение дополнительных фаз может частично решить проблему пробок.

В данной работе предпринята попытка на примере конкретного участка дороги исследовать различные режимы работы светофора и установить, как меняется время проезда светофора, образование пробок при этих режимах. Перебор возможных настроек или их численная оптимизация могут позволить улучшить пропускную способность дорожной сети. Как указано выше, наличие адекватной модели при этом является первым граничным условием для проведения оптимизации. Рекламные заявления разработчика системы моделирования AnyLogic тем не менее не дают гарантии, что в нём можно воспроизвести сложный перекресток и исследовать возможность уменьшения очередей на нём.

Конечно, данная постановка цели является достаточно узкой. Хотелось бы не только подбирать разные наилучшие настройки светофоров на разные интервалы времени, но и контролировать в режиме реального времени, насколько они хороши в действительности. И время от времени в средствах массовой информации появляются материалы о том, что где-то вроде бы подобные решения разрабатываются и чуть ли не внедряются. Однако периодичность подобных заявлений, год за годом очень похожих, заставляет сделать вывод, что с результатами всё не так оптимистично, как пишут журналисты. Хорошо известно, что камер контроля полос и скорости на дорогах очень много, они приносят непосредственный доход в местные бюджеты, а вот установок из цепочек камер на последовательных опорах для видеосъемки очереди автомобилей автограм не приходилось видеть нигде. Тем более работающих и как-то влияющих на время горения красного или зеленого поворотного сигнала.

Поэтому авторы решили сосредоточиться на реальном: опробовать возможности AnyLogic на реальном объекте и сделать вывод об адекватности результатов моделирования перекрестка с его использованием.

Построение модели

В работе рассмотрены вопросы организации светофора на перекрёстке на основе использования имитационного моделирования и средств оптимизатора в среде AnyLogic. Модель участка дорожной сети создана на основе спутникового снимка местности. Для создания и исследования модели использована версия AnyLogic 8.8.6. Фрагмент потоковой диаграммы улично-дорожной сети показан на рис. 1.

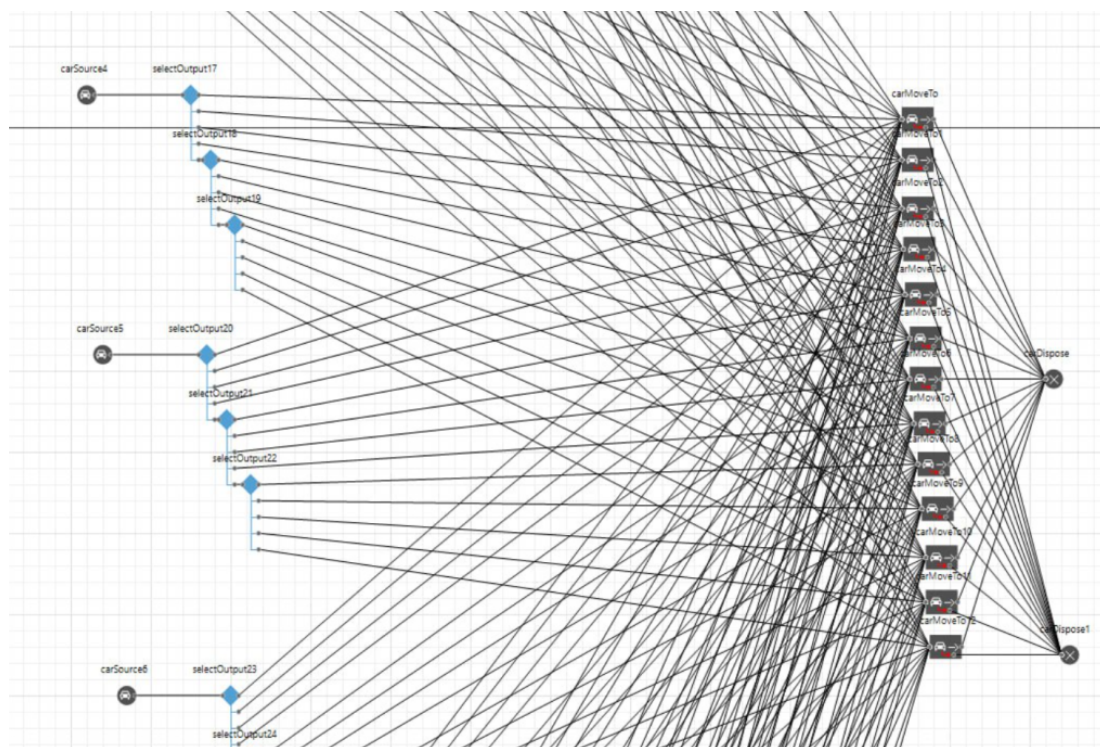


Рис. 1. Потоковая диаграмма улично-дорожной сети
Fig. 1. Flow chart of the road network

Исследование проведено на примере перекрёстка ул. Юбилейная – ул. Свердлова в г. Березники. Исследуемый перекрёсток имеет 10 точек входа: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – точки входа по ул. Юбилейной; 7, 8, 9, 10 – точки входа по ул. Свердлова (рис. 2).

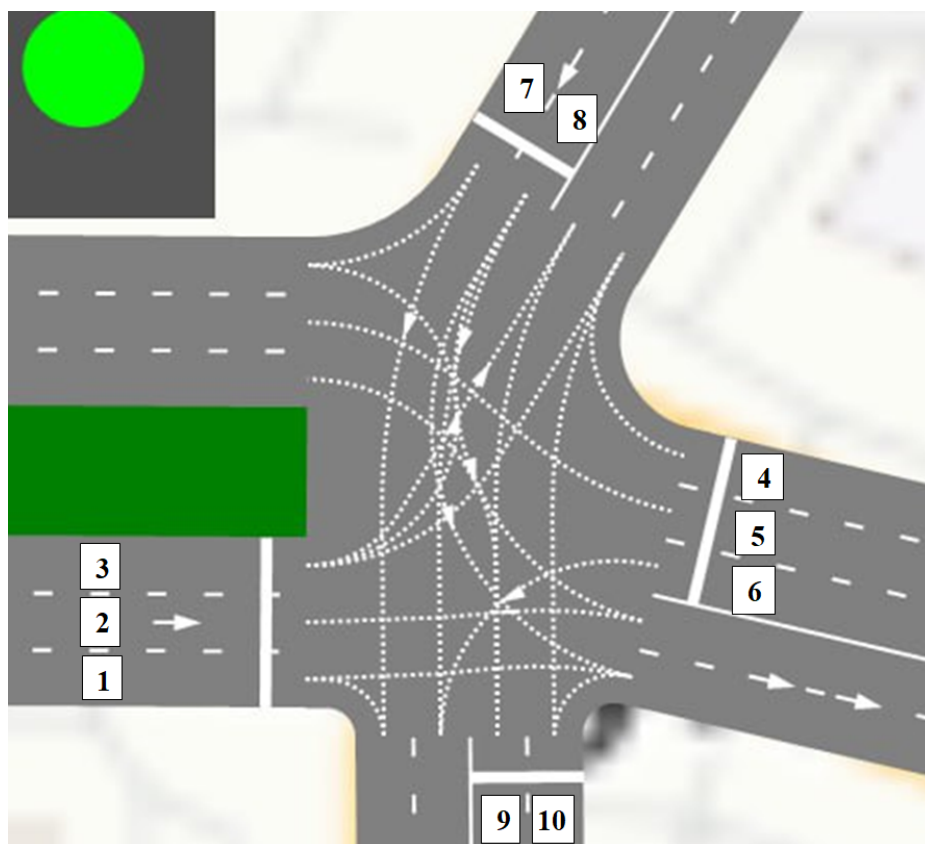


Рис. 2. Графическое представление моделируемого перекрёстка
Fig. 2. Graphical representation of the simulated intersection

При построении модели были учтены существующие настройки светофора: параметры переключения режимов работы светофора, наличие дополнительной секции светофора, разрешающей поворот налево с крайней левой полосы, а также возможность поворота направо с крайней правой полосы.

Цикл работы светофора показан на рис. 3.

	Полный цикл	Режим работы светофора			
ул. Свердлова	84		34	50	34
ул. Юбилейная от Мелодии поворот налево (в сторону моста)	84	20	64	20	64
ул. Юбилейная	84		30	54	30

Рис. 3. Режим работы светофора
Fig. 3. Traffic light operation mode

Интенсивность транспортных потоков указана на рис. 4.

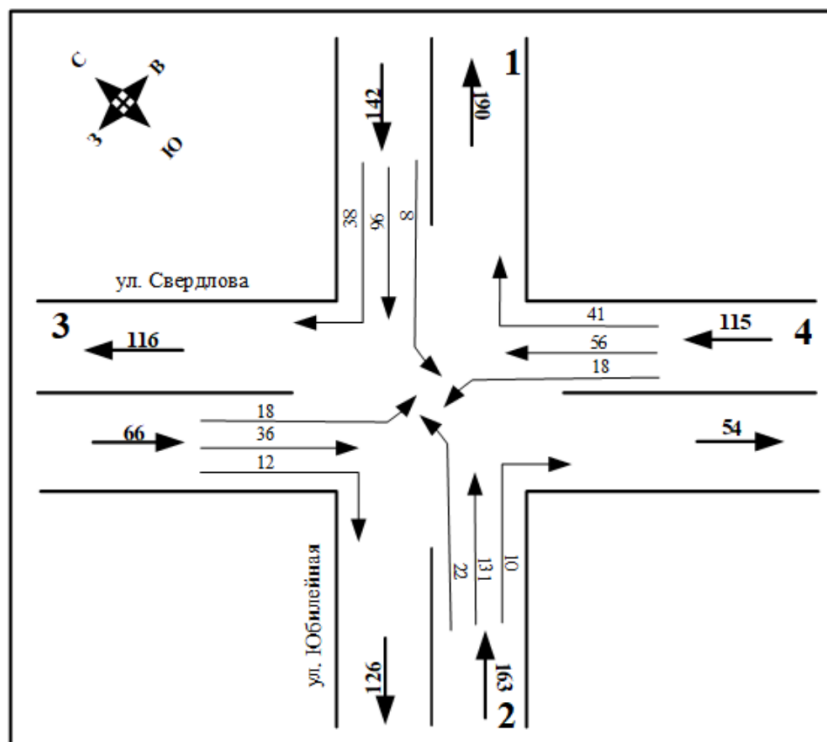


Рис. 4. Интенсивность транспортных потоков в утренний час-пик²
Fig.4. The intensity of traffic flows during the morning rush hour

Результаты моделирования

При существующем режиме работы светофора, описанном выше, в период пиковой нагрузки наблюдается скопление машин на перекрёстке в точках входа 1, 2, 5, 6, т. е. при движении по ул. Юбилейной прямо (рис. 5). Это соответствует ситуации на данном участке с работой светофоров в существующем режиме.

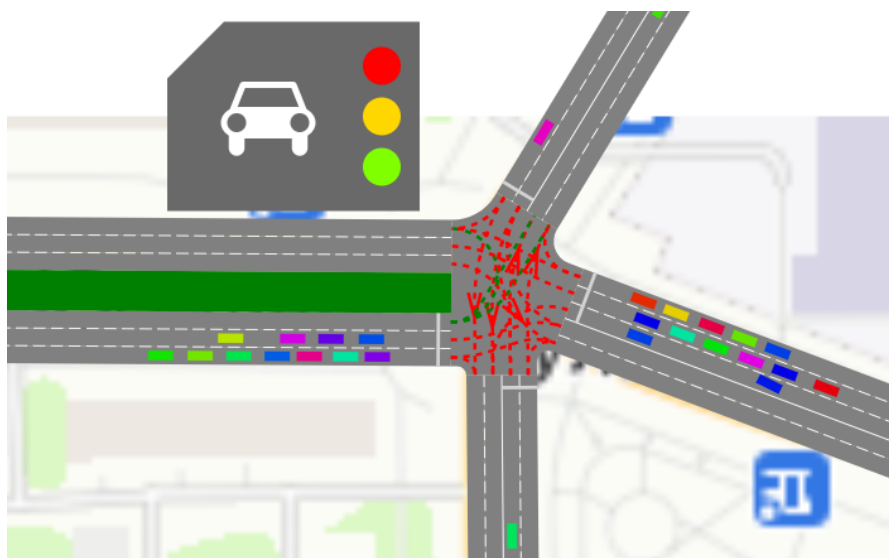


Рис. 5. Ожидание проезда перекрёстка при максимальной нагрузке
при существующем режиме светофора
Fig. 5. Waiting for the intersection to pass at maximum load with the existing traffic light mode

² Комплексная схема организации дорожного движения города Березники Пермского края. Т. 1. Отчет по сбору исходных данных. Ставрополь, 2020. URL: <https://adm-brz.ru/upload/docs/Kompleksnaya-shema-organizatsii-dorozhnogo-dvizheniya-goroda-Berezniki-Permskogo-kрая.zip> (дата обращения: 16.10.2024).

Поскольку в пиковые нагрузки большая часть машин движется по ул. Юбилейная прямо (на левый поворот уходит только 10 % машин), в модели увеличили время зелёного сигнала прямо по ул. Юбилейной и прямо по ул. Свердлова на 10 с. Это практически не изменило ситуацию на перекрёстке (табл. 1).

При увеличении полного цикла работы светофора до 5 мин (пропорционально существующему графику) наблюдаем увеличение скопления машин во всех точках входа (рис. 6).

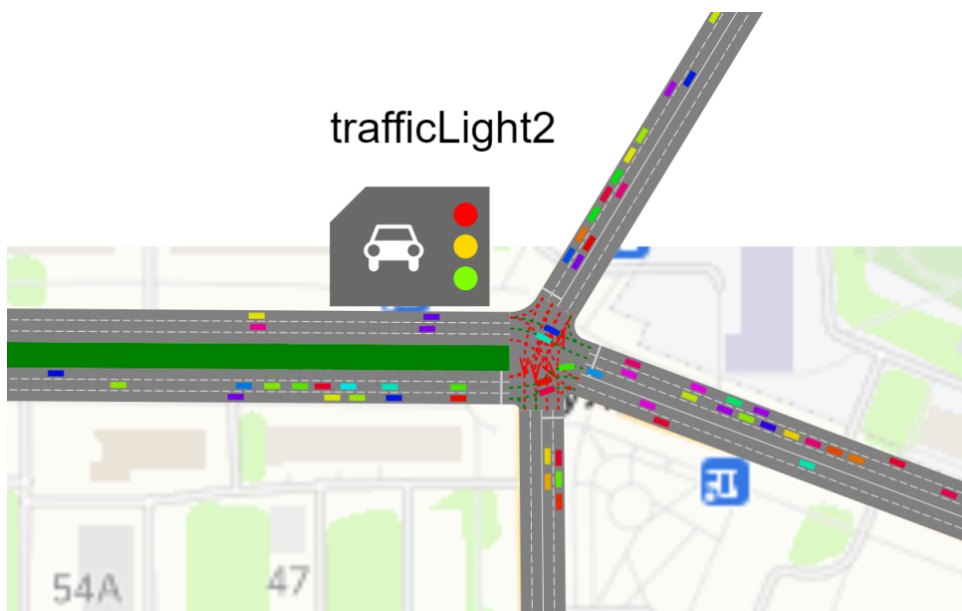


Рис. 6. Цикл работы светофора 5 мин
Fig. 6. The traffic light operation cycle is 5 min

Сокращение полного цикла работы светофора до 30 с уменьшило число автомобилей, ожидающих левый поворот из точки 6 по сравнению с существующим режимом работы светофора (рис. 7). По сравнению с циклом 5 мин число ожидающих проезда машин уменьшилось во всех точках. Но при этом интенсивность смены траекторий движения увеличивается, что может повысить аварийность на перекрёстке.

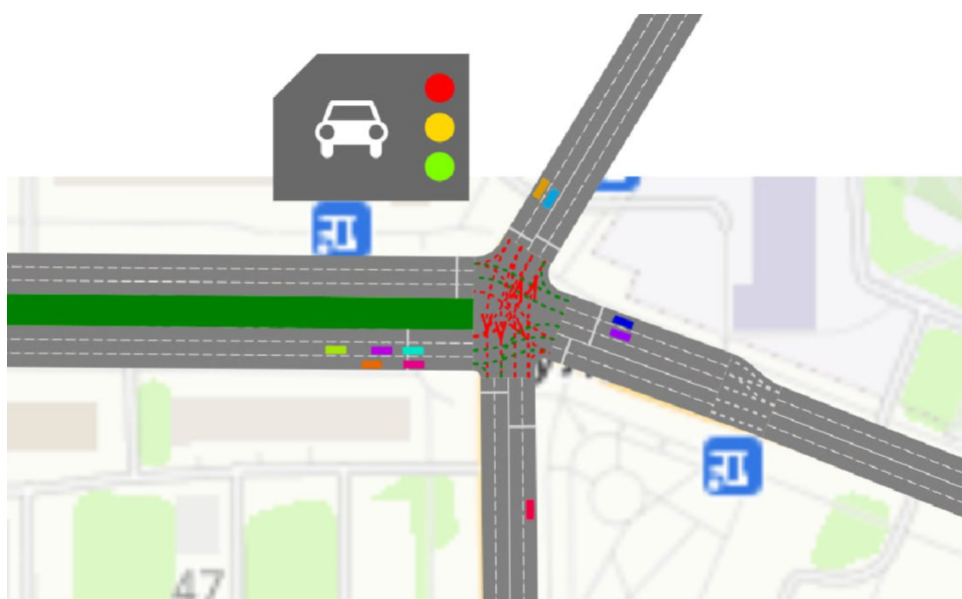


Рис. 7. Цикл работы светофора 30 с
Fig. 7. Traffic light operation cycle of 30 s

Наибольшее число машин, ожидающих проезд перекрёстка, при рассмотренных режимах работы светофора показано в табл. 1. Также в табл. 1 занесены данные по числу машин в пробке при продолжительности цикла работы светофора 1, 2 и 3 мин. Режим работы светофора изменялся пропорционально существующему.

Максимальное число машин в пробке

Таблица 1

Maximum number of cars in a traffic jam

Table 1

Режимы работы светофора	Точки входа на перекрёсток									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Полный цикл 5 мин (75; 105; 120)	14	12	4	9	13	3	11	7	9	11
Полный цикл 3 мин (52; 62; 66)	8	6	3	5	7	2	5	4	6	5
Полный цикл 2 мин (32; 42; 46)	7	5	3	4	6	3	5	5	5	5
Увеличение времени зелёного сигнала для движения прямо на 10 с, цикл работы 1,6 мин (20; 40; 34)	4	6	4	4	9	4	4	4	3	2
Существующий режим 1,4 мин (20; 30; 34)	7	6	2	3	7	6	5	5	1	2
Полный цикл 1 мин (12; 22; 26)	4	4	2	3	4	2	2	2	4	3
Полный цикл 30 с (7; 11; 12)	3	3	1	2	3	2	2	1	3	2

По данным табл. 1 построена зависимость наибольшего числа машин в пробке перед светофором в каждой точке входа от длительности цикла работы светофора (рис. 8).

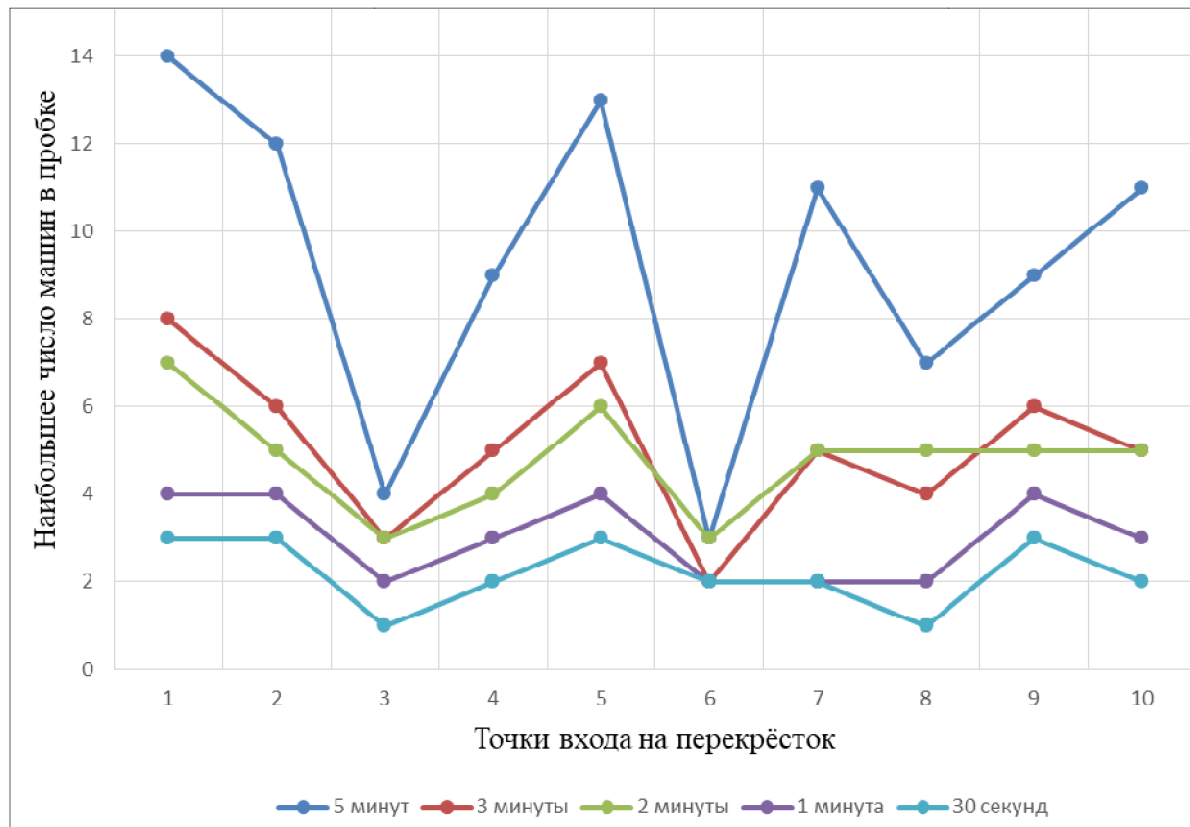


Рис. 8. Зависимость числа машин в пробке от длительности работы светофора
Fig. 8. Dependence of the number of cars in a traffic jam on the duration of the traffic light operation

Увеличение полного цикла работы светофора практически во всех точках входа на перекресток увеличивает число ожидающих проезда автомобилей. В точках 3 и 6 (точки поворота налево) при увеличении длительности цикла работы светофора число машин в пробке увеличивается незначительно, а в точках 1, 2, 5, 7, 10 увеличение цикла работы светофора от 30 с до 5 мин значительно увеличивает число ожидающих машин (см. рис. 8).

При полном цикле 30 с наблюдаются самые малые по количеству автомобилей пробки, но при таком режиме светофора скорее всего вырастет аварийность. Кроме того, не будет возможности перейти дорогу пешеходам.

Определение среднего времени левого поворота

При создании эксперимента для нахождения среднего времени левого поворота с вводом и без ввода специализированной левоповоротной фазы светофора использована рассмотренная ранее модель перекрестка ул. Юбилейная – ул. Свердлова (см. рис. 2). В среде AnyLogic проведено исследование зависимости среднего времени левого поворота от числа поворачивающих налево машин при отсутствии соответствующего сигнала светофора и при введении 20 с на левый поворот. Поворот осуществляется из точки 3 входа на перекресток. Время работы зелёного сигнала по ул. Юбилейной – 50 с, по ул. Свердлова – 34 с. Для исследования выбран следующий трафик: в попутном направлении по ул. Юбилейной движется 430 автомобилей в час, во встречном направлении 490 автомобилей в час. На левый поворот (на ул. Свердлова) последовательно отправляется 10, 20, 30 и 40 % машин. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость среднего времени проезда перекрёстка от числа поворачивающих налево машин при встречном трафике 490 автомобилей в час

Table 2

The dependence of the average travel time of an intersection on the number of cars turning left in oncoming traffic is 490 vehicles per hour

Число машин, поворачивающих налево, %	Среднее время проезда перекрёстка без дополнительного режима светофора, с				Среднее время проезда перекрёстка с дополнительным сигналом светофора, с			
	Точки входа на перекрёсток				Точки входа на перекрёсток			
	2	3	5	6	2	3	5	6
10	26,77	47,48	31,23	36,96	43,31	51,74	55,67	62,45
20	27,57	51,72	31,86	36,73	43,62	57,53	60,93	58,89
30	26,74	56,88	31,21	33,87	41,7	90,69	60,42	53,69
40	26,92	180,2	40,38	32,67	42,92	208,6	60,82	50,47

Время прямолинейного движения (точки 2 и 5) практически не зависит от числа поворачивающих налево машин, но при наличии третьей секции светофора оно в среднем на 20 с больше, так как к нему добавляется время запрещающего режима светофора для осуществления левого поворота. Время левого поворота встречного движения (точка 6) в обоих случаях уменьшается при увеличении числа машин, поворачивающих из точки 3, поскольку число машин, двигающихся прямо, уменьшается. При введенном дополнительном сигнале светофора это время больше в среднем на длительность дополнительного сигнала.

Среднее время проезда перекрёстка из точки 3 (левый поворот) увеличивается в зависимости от числа поворачивающих машин. Причем это время больше для случая с дополнительной разрешающей секцией светофора. Графически зависимость представлена на рис. 9.

В табл. 3 показано среднее время проезда перекрёстка при левом повороте из точки 3, для которого отсутствует и затем вводится левоповоротная фаза светофора. Встречный поток увеличен с 490 до 700 машин в час.

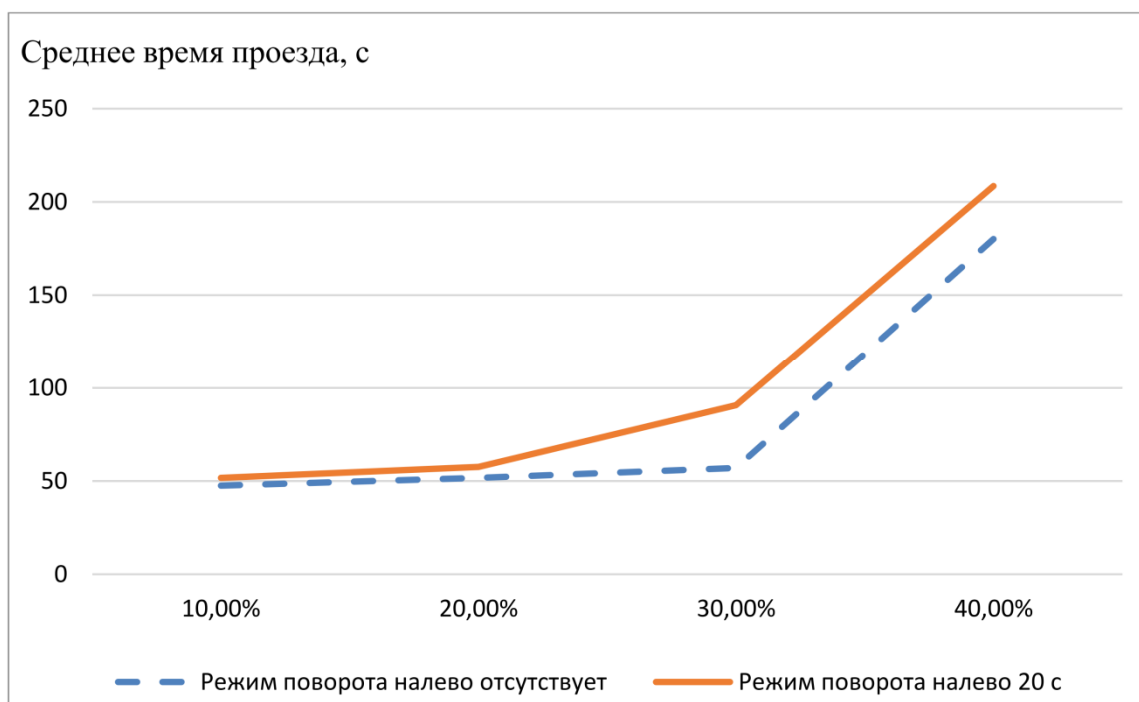


Рис. 9. Зависимость среднего времени проезда перекрёстка от числа поворачивающих налево машин при встречном трафике 490 машин в час

Fig. 9. Dependence of the average travel time of an intersection on the number of cars turning left in oncoming traffic of 490 cars per hour

Таблица 3

Зависимость среднего времени проезда перекрёстка от числа поворачивающих налево машин при встречном трафике 700 автомобилей в час

Table 3

The dependence of the average travel time of an intersection on the number of cars turning left in oncoming traffic of 700 vehicles per hour

Режим работы светофора	Число машин, поворачивающих налево, %			
	10	20	30	40
Без левоповоротной фазы, с	55,65	87,05	128,5	395,68
С левоповоротной фазой 20 с, с	53,39	57,5	92,66	202,1

Здесь наблюдается противоположная ситуация: при увеличении интенсивности встречного движения до 700 автомобилей в час среднее время левого поворота без выделенного сигнала светофора резко возрастает с увеличением числа поворачивающих налево машин по сравнению с поворотом с выделенной фазой светофора. Так, при повороте 43 автомобилей в час (10 % поворачивающих машин) это время в 1,04 раза больше, чем при выделенном сигнале светофора, при повороте 86 автомобилей в час (20 % поворачивающих машин) – в 1,5 раза больше, при повороте 172 автомобилей в час (40 % поворачивающих машин) время проезда увеличивается в 1,9 раза.

Графически зависимость представлена на рис. 10.

Введение третьей левоповоротной фазы светофора в этом случае необходимо: при увеличении интенсивности потока время просачивания уменьшается, завершить поворот зачастую удаётся только тогда, когда желтый сигнал светофора прерывает прямолинейное движение автомобилей во встречном направлении. За этот короткий промежуток времени повернуть успевают не все машины. Третья фаза светофора увеличивает время поворота.

Для перекрёстка ул. Юбилейная – ул. Свердлова в г. Березники дополнительный сигнал светофора увеличивает время ожидания проезда. Но введение левоповоротного сигнала светофора снижает аварийность, облегчает поворот, поэтому его введение целесообразно.

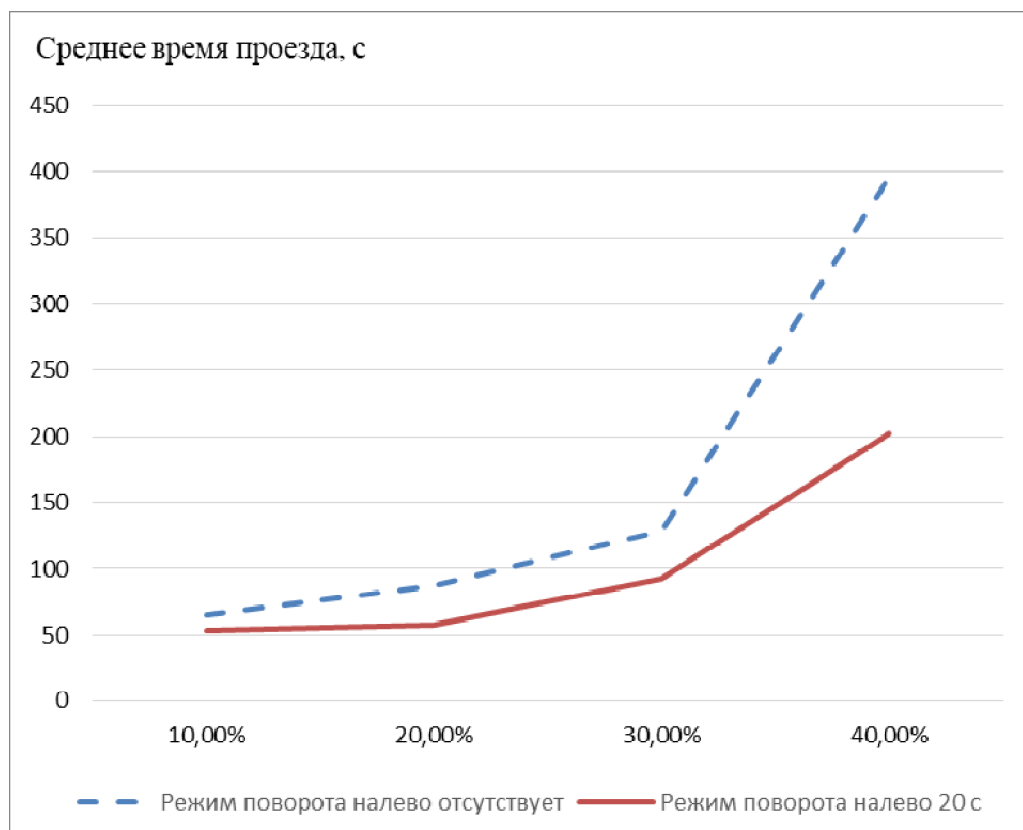


Рис. 10. Зависимость среднего времени проезда перекрёстка от числа поворачивающих налево машин при встречном трафике 700 машин в час

Fig. 10. Dependence of the average travel time of an intersection on the number of cars turning left in oncoming traffic of 700 cars per hour

Заключение

Моделирование транспортных потоков на перекрёстке улиц Юбилейная – Свердлова в г. Березники Пермского края показало:

1) увеличение длительности цикла работы светофора до 5 мин увеличивает число машин в пробке в 2–3 раза, уменьшение длительности циклов работы светофора до 30 с уменьшает пробки по сравнению с пятиминутным циклом, но при этом нет возможности перейти дорогу пешеходам;

2) ввод специализированной левоповоротной фазы светофора при встречном трафике 490 автомобилей в час повышает время проезда светофора;

3) при встречном трафике 700 автомобилей в час время проезда перекрёстка без дополнительной секции светофора больше, чем при введённом дополнительном сигнале.

Важным частным результатом исследования является проверка возможности моделирования подобных ситуаций в AnyLogic с последующей оценкой адекватности полученных результатов. Нарботан опыт, позволяющий по необходимости уточнить эту модель или идентифицировать параметры модели дорожной сети какого-то города и решить задачу уменьшения очередей на перекрестках в пределах возможного.

Результаты произведенной работы дают возможность обоснованно предполагать, что при наличии заинтересованности у городской власти или инспекции по безопасности дорожного движения вполне реально произвести более масштабные измерения потоков в разное время дня и года и получить работоспособную модель, позволяющую оптимизировать настройки светофоров: устанавливать разные настройки в разные интервалы времени, в разные дни недели, либо переключаться между настройками, ведущими к оптимизации различных критериев, по команде из диспетчерской системы города. При очевидной бесперспективности продвижения систем мониторинга реального времени в большинстве городов РФ, не располагающих свободными бюджетами для их создания, это представляется нам единственным способом улучшения дорожного

движения в смысле увеличения пропускной способности улично-дорожной сети, предотвращения автомобильных заторов, уменьшения задержек в движении транспорта, в значит, в итоге – повышения безопасности дорожного движения. Пока же подобная заинтересованность не возникает. Однако это не мешает авторам констатировать, что в инициативном порядке они к таковой подготовились в достаточной мере.

Список литературы

1. Тун Мин У, Лупин С.А. Сравнение результатов аналитического расчёта и имитационного моделирования транспортных систем // *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Vol. 12, no. 5. P. 103–108.
2. Сравнение систем структурного и имитационного моделирования Stratum 2000, Simulink, AnyLogic / В.В. Мокшин, А.П. Кирпичников, Д.Н. Маряшина и др. // *Вестник технологического университета*. 2019. Т. 22, № 4. С. 144–148.
3. Цзянг Хайянь. Моделирование передвижения транспортных средств на основе макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2022, Т. 16, №2. С. 22–28. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28
4. Daganzo C.F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2007. Vol. 41, iss. 1. P. 49–62. DOI: 10.1016/j.trb.2006.03.001
5. Холодов Ю.В., Норов А.С. Анализ развития автомобильной пробки с использованием основной транспортной диаграммы // *Вестник ВГАВТ*. 2013. Вып. 37. С. 117–124.
6. Разработка имитационной дискретно-событийной модели транспортной инфраструктуры с использованием инструментов оптимизации / Д.В. Кузьмин, В.В. Багинова, Д.А. Краснобаев, Д.В. Мусатов // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2023. Т. 17, № 2. С. 42–48. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-17-2-42-48
7. Оптимизация времени проезда перекрестков в среде имитационного моделирования AnyLogic / П.С. Медведев, А.Т. Садыкова, Г.Л. Нуруллина, А.Л. Нуруллина // *Перспективные информационные технологии (ПИТ 2019): тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Самара, 24–26 июня 2019 года)*. Самара: Самарский научный центр РАН, 2019. С. 605–609.
8. Андронов С.А. Разработка и исследование имитационной модели светофорного регулирования на основе нечеткой логики в среде AnyLogic // *Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2015): тр. VII Всерос. науч.-практ. конф. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2015. Т. 2. С. 443–449.*
9. Евтушенко А.Е. Исследование работы перекрестка на микроуровне с использованием средств оптимизации в среде AnyLogic // *Системный анализ и логистика*. 2020. № 3 (25). С. 41–51. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-3-41-51
10. Компьютерное моделирование проблемного перекрестка в среде AnyLogic / А.В. Ли, В.С. Репкин, Г.Ю. Семенов и др. // *Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика*. 2023. Т. 1, № 2. С. 1–10. DOI: 10.18799/29495407/2023/2/16
11. Реенко Н.А., Михайлов А.С. Разработка имитационной модели дорожного движения в программной среде AnyLogic // *Решетневские чтения: материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. (Красноярск, 12–16 ноября 2018 года)*. Красноярск: СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2018. Т. 2. С. 153–155.
12. Соловьев Н.А., Павлов А.Д. Разработка имитационной модели дорожного движения в программной среде AnyLogic // *Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): сб. тр. одиннадцатой всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (Казань, 18–20 октября 2023 года)*. Казань: Изд-во АН РТ, 2023. С. 711–717.
13. Панькина К.Е. Модель анализа эффективности работы регулируемого перекрестка при просачивании транспортных средств сквозь встречный поток // *Логистика и управление цепями поставок*. 2023, Т. 20, № 1 (106). С. 68–74.
14. Анализ процесса ввода специализированной левоповоротной фазы регулирования / С.В. Дорохин, Д.В. Лихачев, С.А. Богданов, А.В. Сорокин // *Воронежский научно-технический вестник*. 2020. Т. 4, № 4 (34). С. 51–63. DOI: 10.34220/2311-8873-2021-4-4-51-63

15. Ерицян Г.С. О пропуске левоповоротных транспортных потоков на регулируемом перекрестке // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. 2020. № 1. С. 95–101.

References

1. Tun Min Oo, Lupin S.A. Analytical calculations in comparison with simulation modeling of transport systems. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024;12(5):103–108. (In Russ.)
2. Mokshin V.V., Kirpichnikov A.P., Maryashina D.N., Stadnik N.A., Zolotukin A.V. Comparing structural and simulation modelling systems: Stratum 2000, Simulink, and Anylogic. *Herald of Technological University*. 2019;22(4):144–148. (In Russ.)
3. Jiang Haiyan. Modeling the movement of vehicles based on a macroscopic fundamental diagram of the traffic flow. *T-Comm*. 2022;16(2):22–28. (In Russ.) DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28
4. Daganzo C.F. Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2007;41(1):49–62. DOI: 10.1016/j.trb.2006.03.001
5. Holodov Y.V., Norev A.S. Analysis of the development of the traffic jams with the use of the basic transport chart. *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2013;37:117–124. (In Russ.)
6. Kuzmin D.V., Baginova V.V., Krasnobaev D.A., Musatov D.V. Development of a discrete-event simulation model of transport infrastructure using optimization tools. *T-Comm*. 2023;17(2):42–48. (In Russ.) DOI: 10.36724/2072-8735-2022-17-2-42-48
7. Medvedev P.S., Sadykova A.T., Nurullina G.L., Nurullina A.L. [Optimization of crossing time in the AnyLogic simulation environment]. In: *Promising Information Technologies (PIT 2019): proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Samara, June 24–26, 2019*. Samara: Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2019. P. 605–609. (In Russ.)
8. Andronov S.A. [Development and research of a simulation model of traffic light regulation based on fuzzy logic in the AnyLogic environment]. In: *Simulation modeling. Theory and Practice (IMMOD-2015): proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference*. Moscow: Publishing House of IPU RAS; 2015. Vol. 2. P. 443–449. (In Russ.)
9. Evtushenko A.E. Research of the intersection operation at the micro level using optimization tools in the AnyLogic environment. *Systems Analysis and Logistics*. 2020;3(25):41–51. (In Russ.) DOI: 10.31799/2007-5687-2020-3-41-51
10. Li A.V., Repkin V.S., Semenov G.Yu., Sermavkin N.I., Faerman V.A. Computer simulation of a problem crossroad in the anylogic environment. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Industrial cybernetics*. 2023;1(2):1–10. (In Russ.) DOI: 10.18799/29495407/2023/2/16
11. Reenko N.A., Mikhaylov A.S. Development of the imitation model of road traffic in the AnyLogic software. In: *Reshetnev Readings: Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference (Krasnoyarsk, November 12–16, 2018)*. Krasnoyarsk: Reshetnev University; 2018. Vol. 2. P. 153–155. (In Russ.)
12. Solovyov N.A., Pavlov A.D. Development of a traffic simulation model in the AnyLogic software environment. In: *Simulation modeling. Theory and Practice (IMMOD-2023): Proceedings of the eleventh All-Russian Scientific and Practical conference on simulation modeling and its application in science and industry (Kazan, October 18–20, 2023)*. Kazan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; 2023. P. 711–717. (In Russ.)
13. Pankina K.E. A model for analyzing the efficiency of a regulated intersection when vehicles leak through oncoming traffic. *Logistics and Supply Chain Management*. 2023;20(1(106)):68–74. (In Russ.)
14. Dorokhin S.V., Likhachev D.V., Bogdanov S.A., Sorokin A.V. Analysis of the process of entering a specialized left-steering phase regulation. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2020;4(4(34)):51–63. (In Russ.) DOI: 10.34220/2311-8873-2021-4-4-51-63
15. Yeritsyan G.S. The pass of left turn traffic flow in regulated intersections. *Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Mechanics, Machine Science, Machine-Building*. 2020;(1):95–101. (In Russ.)

Информация об авторах

Володина Юлия Игоревна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; julia_volodina@mail.ru.

Сергеев Никита Олегович, магистрант кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; nikitosserg5@gmail.com.

Затонский Андрей Владимирович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; zxenon@narod.ru.

Information about the authors

Julia I. Volodina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; julia_volodina@mail.ru.

Nikita O. Sergeev, Master's student of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; nikitosserg5@gmail.com.

Andrey V. Zatonskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; zxenon@narod.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.02.2025

The article was submitted 13.02.2025