

УДК 656.14.021

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМ ТРАФИКОМ¹

Скоробогатченко Дмитрий Анатольевич

¹Профессор кафедры САПрПК;
Волгоградский государственный технический университет;
Россия, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28;
e-mail: dmitryskor2004@gmail.com.

Приоритетным направлением развития городской улично-дорожной сети (УДС) является внедрение автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД). Одним из ключевых элементов АСУДД является эффективное управление светофорными объектами. В условиях максимальной загрузки проезжей части транспортными средствами реализовать такое управление возможно путем внедрения адаптивной системы регулирования транспортных потоков. Авторами проведен анализ существующих средств моделирования транспортных потоков. Исходя из возможностей использования адаптивных средств регулирования дорожного движения в качестве инструмента моделирования предлагается использовать комплекс Simulation of urban mobility (SUMO). По результатам экспериментов построены основные диаграммы транспортных потоков. На языке Python написан скрипт для интерпретации результатов моделирования и наглядного представления основных диаграмм транспортного потока. Результаты показывают, что применение адаптивных средств регулирования дорожного движения даже на отдельных перекрестках дает увеличение пропускной способности по всей УДС на 20-30 %. Предложенные результаты могут быть использованы при моделировании функционирования УДС сетей различного типа с использованием адаптивных светофорных объектов.

Ключевые слова: автоматизированная система управления дорожным движением, адаптивное регулирование, адаптивный светофор, моделирование транспортных потоков, задержки и очереди транспортных средств, SUMO.

Для цитирования:

Скоробогатченко Д. А. Моделирование адаптивных систем управления городским трафиком // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. 2022. № 2. С. 1–10. URL : <http://sanse.ru/download/466>.

MODELING OF ADAPTIVE SYSTEMS OF URBAN TRAFFIC MANAGEMENT

Skorobogatchenko Dmitry A.

¹Professor of the CAD&PK Department;
Volgograd State Technical University;
28 Lenina Av., Volgograd, 400005, Russia;
e-mail: dmitryskor2004@gmail.com.

A priority direction in the development of the urban street and road network is the introduction of automated traffic control systems (ATCS). One of the key elements of ATCS is the efficient management of traffic lights. Under conditions of maximum traffic load on the roadway, it is possible to implement such control by introducing an adaptive traffic control system. The authors analyzed the existing means of traffic flow modeling. Based on the possibilities of using adaptive traffic control tools, it is proposed to use the

¹Выпуск подготовлен в рамках реализации гранта на разработку программ бакалавриата и программ магистратуры по профилю «Искусственный интеллект», а также на повышение квалификации педагогических работников образовательных организаций высшего образования в сфере искусственного интеллекта (конкурс 2021-ИИ-01 от 10.06.2021)

Simulation of urban mobility (SUMO) complex as a modeling tool. Based on the results of the experiments, the main traffic flow diagrams were drawn. A script was written in Python to interpret the simulation results and visualize the main traffic flow diagrams. The results show that the use of adaptive traffic control even at individual intersections gives an increase in throughput across the entire road network by 20-30%. The proposed results can be used in modeling the functioning of the network of various types of networks using adaptive traffic lights.

Keywords: automated traffic control system, adaptive regulation, adaptive traffic light, simulation of traffic flows, vehicle delays and queues, SUMO.

For citation:

Skorobogatchenko D. A. Modeling of adaptive systems of urban traffic management. System Analysis in Science and Education, 2022;(2):1–10(In Russ). Available from: <http://sanse.ru/download/466>.

Введение

Сообщение общего характера, излагающее суть статьи. Современной мировой тенденцией является рост автомобилизации [1]. Рост уровня автомобилизации требует соответствующего развития инфраструктуры в виде плотности сети автомобильных дорог, расширения парковочного пространства, и совершенствования средств регулирования дорожного движения. Однако, как показывает практика, темпы развития транспортной инфраструктуры существенно отстают от темпов автомобилизации, что особенно актуально для городской УДС, экстенсивное развитие которой существенно ограничено [2]. Следствием этого является исчерпание ресурса пропускной способности городскими агломерациями. Это приводит к ряду серьезных социально-технических, экономических и экологических последствий. Так, рост плотности транспортного потока вызывает падение средней скорости движения транспорта [3, 4], рост дорожно-транспортных происшествий и, негативно отражается на экологическом состоянии городской среды.

Чтобы удовлетворить постоянно растущий спрос на трафик, городские УДС нуждаются в эффективных решениях. В соответствии с Транспортной стратегией России, качество транспортных систем необходимо повышать внедрением АСУДД как части городских ИТС и повышением эффективности управления светофорными объектами [5]. Одним из самых быстрых и экономически целесообразных способов уменьшить заторы на перекрестках и улучшить эффективность функционирования городской УДС является оптимизация времени сигнала светофора (TST). Следовательно, в настоящее время особую актуальность приобретают вопросы, связанные с оптимизацией систем управления сигналами дорожного движения [6] для минимизации средних задержек транспортных средств [7] с учетом неоднородной структуры транспортного потока [8].

Анализируя современные подходы к управлению светофорными объектами, необходимо отметить, что в настоящее время выделяют фиксированную, активированную и адаптивную стратегии управления трафиком [9]. С подробным анализом основных стратегий управления можно ознакомиться здесь [10, 11].

Стратегия фиксированного времени устанавливает оптимальные планы сигналов для фиксированных последовательностей фаз сигнала с фиксированной продолжительностью времени для каждой фазы. Введение стратегии фиксированного времени предполагает, относительно равномерный трафик, обобщенный за определенный период. Активированная стратегия собирает данные в реальном времени с датчиков инфраструктуры и определяет необходимость продления зеленого света или завершения фазы. Адаптивная стратегия представляет собой проактивную стратегию, когда условия прогнозируются на ближайшее будущее. Адаптивная стратегия реализована с использованием различных алгоритмов, в результате чего разработано несколько систем адаптивного управления сигналами *ACS-Lite*, *SCATS*, *SCOOT*, *OPAC*, *MOTION*, *UTOPIA* и *RHODES*.

Наиболее актуальным в настоящее время является использование адаптивного регулирования дорожного движения на городских УДС. Именно адаптивным светофорные циклы позволяют повысить пропускную способность и улучшить равномерность параметров дорожного движения [12]. В результате уменьшается количество остановок, торможений, износ ходовой части автомобилей, расход моторного масла и топлива, снизится экологическая нагрузка на окружающую среду.

Таким образом цель работы заключается в моделировании влияния адаптивных средств регулирования дорожного движения на различные типы городской улично-дорожной сети.

1. Анализ существующих программных продуктов

Программы для моделирования транспортных потоков и систем принято делить на программы, относящиеся к микро- меза- и макроуровням моделирования, а также на программы, поддерживающие сразу несколько уровней [13].

На микроуровне транспортные средства рассматриваются как индивидуальные сущности, обладающие своими характеристиками и поведением. Здесь преобладают модели, в которых ускорение автомобиля описывается некоторой функцией от скорости этого автомобиля, расстояния до впереди идущего автомобиля и скорости относительно лидера [14]. На мезоуровне отдельно взятые машины не моделируются, но учитываются поведенческие особенности водителей. К этому уровню относятся кластерные модели [15], оперирующие группами автомобилей, движущихся с приблизительно одинаковой скоростью на небольшом расстоянии друг от друга, и модели, использующие распределения вероятностей для описания скоростей транспортных средств на определенных участках дороги. На макроуровне транспортная сеть рассматривается единое целое, а потоки автомобилей – как потоки частиц в жидких средах [16].

Для практической реализации моделей транспортной инфраструктуры существует достаточно большое количество информационных систем, включающих в себя широкий спектр функциональных направленностей [17].

подавляющее большинство инструментов для моделирования представляют собой реализацию микроуровневых моделей. Примерами могут служить *SUMO*, *PARAMICS*, *AIMSUN*, *VISSIM*, *PLANSIM-T*, *AUTOBAHN*, *TRANSIMS*, *FLEXSYT-II*, *INTEGRATION*, *SimTraffic 6*, *MITSIM* и ряд других. Детальный обзор пакетов для микромоделирования можно найти в [18].

Отдельного внимания заслуживает *AnyLogic*, расширение которой для анализа дорожно-транспортного комплекса представлен в [19]. Так же нельзя не отметить «Avenue 2.0», представляющий собой очень простой и удобный в работе продукт для определения эффективных фаз и построения согласованных циклов.

Важно подчеркнуть, что в таких продуктах как *CORSIM*, *Paramics Modeller*, *Aimsun*, *SimTraffic*, *PTV VISUM* и *VISSIM* исходный код не доступен для изменения или исследования [20].

Из всего перечисленного наибольший интерес, на наш взгляд, представляют собой продукты от *PTV Group*, комплекс *AnyLogic* и пакет *SUMO*.

VISSIM и *VISSUM* от *PTV Group* обладают широким функционалом, отличной визуализацией и интеграцией, однако практическое использование затруднено значительной стоимостью рабочего пакета. Расширение для проектирования дорожной инфраструктуры *AnyLogic* дает возможности для анализа пропускной способности дорог, включая статистику возникновения пробок и заторов, позволяет осуществлять размещение светофоров и проводить оптимизацию светофорных фаз. Кроме этого, *AnyLogic* предоставляет большой простор для применения адаптивных алгоритмов регулирования дорожного движения [21]. Однако код закрыт и исследователю предлагается использовать набор готовых инструментов.

Пакет *SUMO* обладая широким функционалом и отличной визуализацией, дает возможность имитационного моделирования применительно к транспортным процессам города [22]. Среди готовых скриптов *SUMO* располагает реализации инструментами для реализации адаптивных средств регулирования дорожного движения [23]. Кроме этого, исходный код *SUMO* доступен для скачивания, модификации, и существуют версии пакета для ряда популярных операционных систем.

Таким образом для моделирования предлагается использовать комплекс *Simulation of urban mobility (SUMO)*.

2. Моделирование адаптивных транспортных систем

Сбор данных включал в себя два больших этапа. На первом этапе авторами была выделен участок УДС и собраны данные по составу и интенсивности движения. На втором этапе для каждого регулируемого перекрестка выбранной УДС исследованы существующие режимы регулирования движения.

В качестве источника исходных данных нашего исследования использовались наблюдения за транспортными потоками и режимами регулирования на одном из центральных участков УДС г. Волгоград, Россия. Выбор участка не случаен. С одной стороны – это один из центральных участков УДС г. Волгограда, связывающий южную и северную части городской агломерации, географически растянутой вдоль реки Волга более чем на 80 км и в связи с этим, имеющий значительные колебания часовой интенсивности движения в зависимости от времени суток. С другой стороны, как показывают еженедельные наблюдения, колебания часовой интенсивности в течение суток на данном участке достаточно стабильны и имеют ярко выраженный характер с двумя пиками в утренний и вечерний часы пик. Исследуемый участок УДС имеет ряд важных перекрестков со светофорным регулированием, представляющие транспортные артерии, соединяющие перпендикулярное направление трафика (рис. 1).

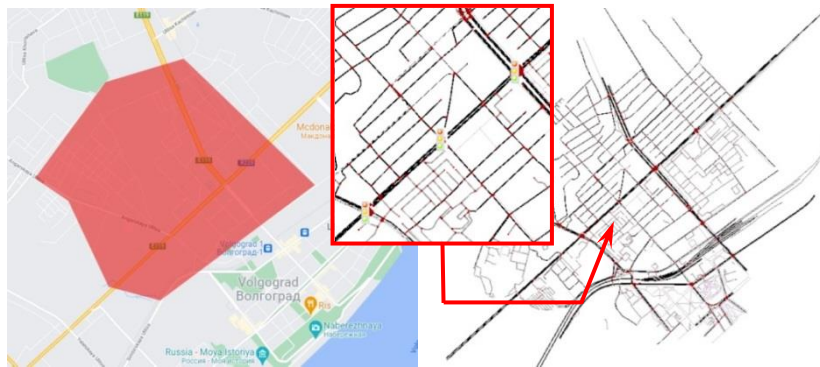


Рис. 1. Расположение участка УДС в Волгограде

На первом этапе, для каждого из пересечений выбранного участка УДС были составлены картограммы движения. Пример картограммы для первого перекрестка представлен на рис. 2. Далее для каждого направления движения по картограмме были проведены замеры часовой интенсивности движения в интервале с 6.00 утра до 24.00 часов. Измерения проводились в будние дни теплого периода в течение месяца.

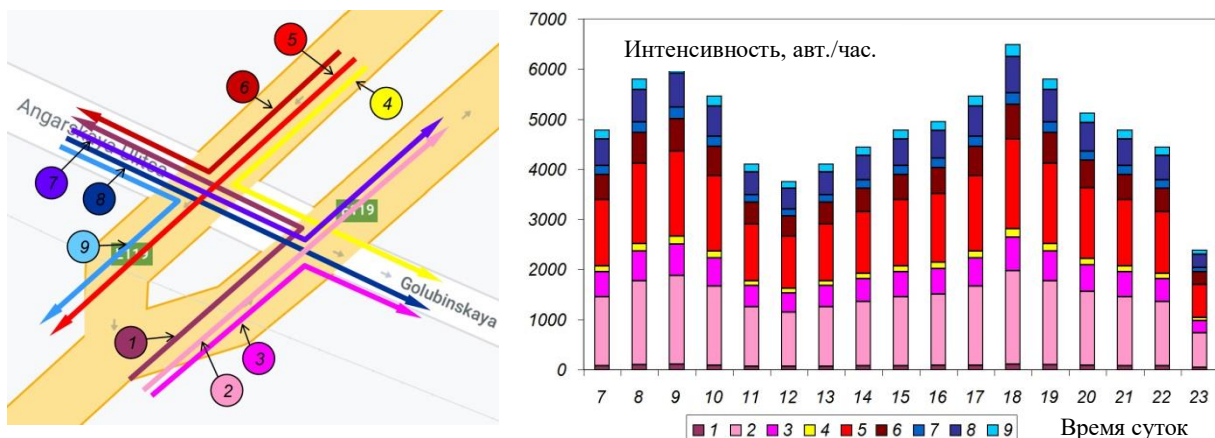


Рис. 2. Картограмма интенсивности

После обработки месячной статистики авторами были получены данные, характеризующие интенсивность движения по каждому направлению картограмм основных пересечений выбранного участка УДС. В результате реализации первого этапа сбора и обработки данных мы располагаем

массивом данных, который включает характеристики интенсивности движения каждого типа ТС по часам суток, разработанный для каждого регулируемого перекрестка УДС.

На втором этапе сбора данных переходим к анализу организации существующего светофорного регулирования на каждом перекрестке. Пример представления данных, характеризующих фазы светофорного цикла для первого регулируемого перекрестка рассматриваемой УДС представлен на рис. 3.

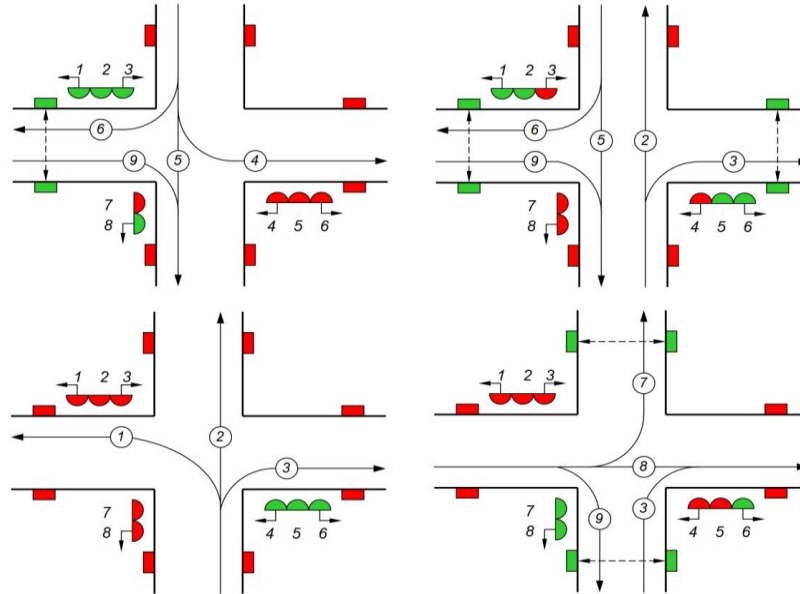


Рис. 3. Пример анализа светофорных циклов по перекрестку

Также на каждом регулируемом пересечении фиксировалась длительность фаз существующего светофорного цикла. Иллюстрация продолжительности фаз светофорного цикла первого перекрестка рассматриваемой УДС представлена на рис. 4.

Группа сигналов	Время, sec.											
	фаза 1			фаза 2			ф.3			фаза 4		
1	17	3		54			3	7	3			
2												
3												
4												
5, 6												
7, 8												
9												

Рис. 4. Пример анализа светофорных циклов на перекрестках

Моделирование осуществлялось в три этапа. В качестве инструмента моделирования транспортных потоков и сбора информации от датчиков использовался пакет *SUMO*.

Структура транспортного потока включала грузовой и легковой транспорт. Общее количество транспортных средств задавалось в файле .csv для индукционных петель. Вариативность в пределах класса транспортных средств определялась в дополнительном файле:

<additional>

<vTypeDistribution id="car">

<vType vClass="passenger" id="passenger1" color=".8,.2,.2" accel="2.6" decel="4.5" sigma="0.5" length="5" minGap="1.5" maxSpeed="70" probability=".4" guiShape="passenger/sedan" emissionClass="P_7_7"/>

<vType vClass="passenger" id="passenger2a" color=".8,.8,.8" accel="3.0" decel="4.5" sigma="0.5" length="4.5" minGap="1.5" maxSpeed="70" probability=".2" guiShape="passenger/hatchback" emission-

```
Class="P_7_7"/>
```

```
<vType vClass="passenger" id="passenger2b" color=".2,.2,.8" accel="2.8" decel="4.5" sigma="0.5"
length="4.5" minGap="1" maxSpeed="70" probability=".2" guiShape="passenger/hatchback" emission-
Class="P_7_7"/>
```

```
...
```

```
</additional>
```

Следует обратить внимание, что в дополнительном файле задаются индивидуальные характеристики транспортных средств как по габаритам и динамике, так и по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу.

По основным полосам на подходах к перекресткам были заложены детекторы *LaneAreaDetector* (E2). Длина детекторов была принята 100 м. Выходы детектора E2 позволили нам измерять потери времени транспортных средств на соответствующей полосе.

На основе полученных данных были построены основные диаграммы транспортного потока для участка УДС центрального района г. Волгограда. В качестве примера на рис. 5 приведены зависимости «скорость потока – плотность потока» и «плотность потока – интенсивность движения» для прямоугольной УДС.

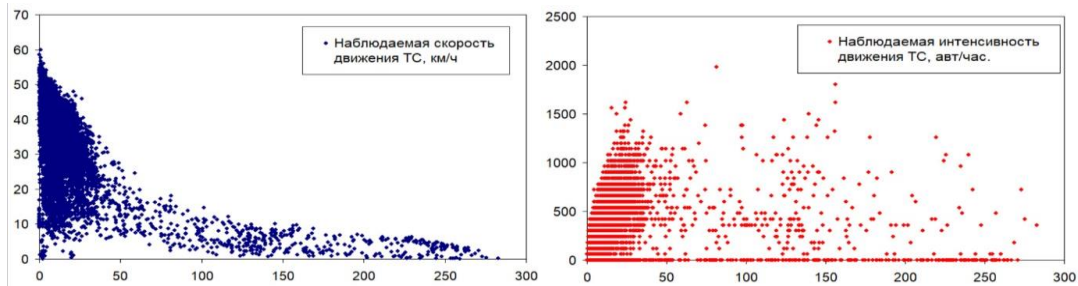


Рис. 5. Визуализация данных основного уравнения транспортного потока для прямоугольной УДС до реализации АСРДД

Визуально можно отметить, что полученные облака точек отражают зависимость основной диаграммы транспортных потоков – экспоненциальную для скорости движения ТС и параболическую для интенсивности движения (см. рис. 6). Явно присутствует облако точек, характерное для зоны А-В, отражающее нормальные условия движения по УДС. При этом имеется достаточно много точек интенсивности лежащее на оси абсцисс. Это свидетельствует о сложных дорожных условиях и заторе в определенный момент времени – плотность достигает определенных значений при нулевой интенсивности.

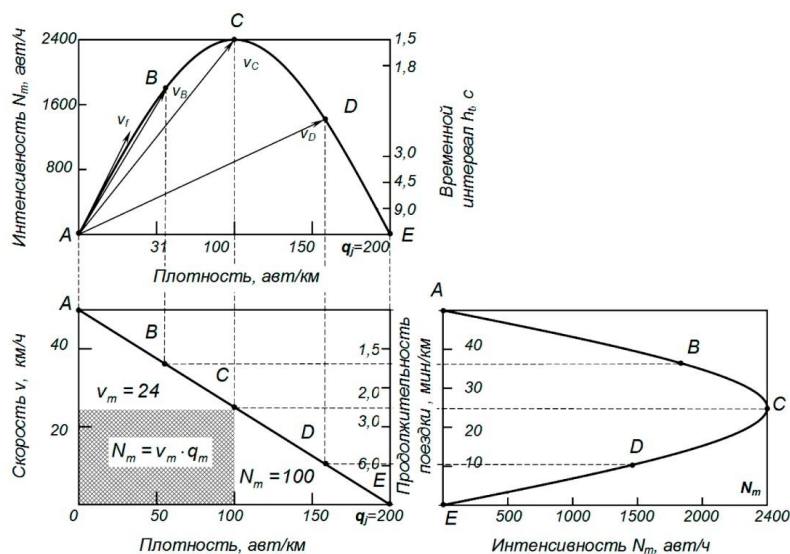


Рис. 6. Основная диаграмма транспортного потока

Во второй части работы на части перекрестков рассматриваемых УДС были установлены светофоры с адаптивным регулированием в зависимости от длины очереди, определяемой по датчикам, установленным на подходе к перекрестку. Зоны размещения датчиков были определены в 100 м для всех средств адаптивного регулирования дорожного движения (АРДД).

Далее авторами был проведен цикл моделирования на всех УДС, с использованием той же структуры транспортных потоков, их интенсивности и маршрутов движения. После обработки выходных данных, описанным выше способом вновь построены основные диаграммы транспортных потоков. В качестве примера на рис. 7 приведены зависимости «скорость потока - плотность потока» и «плотность потока – интенсивность движения» для рассматриваемого участка УДС после реализации в моделях средств АРДД.

Даже беглого взгляда на диаграммы до и после установки средств АРДД достаточно, чтобы констатировать сдвиг облака точек параметра «скорость» влево и вверх и уменьшение количества точек, лежащих на оси «плотность». Аналогичная картина наблюдается при моделировании экспериментов и на других типах сетей. Данное обстоятельство свидетельствует о повышении средней скорости движения транспортных средств и увеличении пропускной способности УДС после введения адаптивных светофоров.

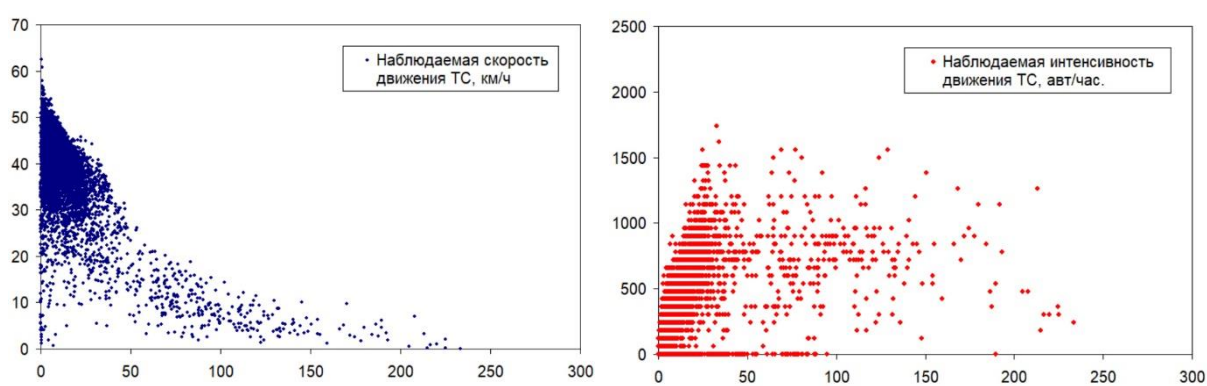


Рис. 7. Визуализация данных основного уравнения транспортного потока для прямоугольной УДС после реализации АРДД

Однако, для точной оценки проводимых мероприятий в области регулирования дорожного движения и принятия обоснованных управленческих решений на стадии планирования работ необходимо располагать функциональной зависимостью основного уравнения транспортного потока. Для реализации этого на языке Python был написан скрипт «*dependency_detection.py*» для обработки результатов моделирования.

Программа считывает выбранные пользователем независимую и зависимую переменные и указанный путь до файла. Последний необходим для задания точек, выражающих зависимость между указанными переменными. Следующим этапом является подготовка данных к поиску медианных значений. Здесь осуществляется очистка массива данных от нулевых значений и упорядочивание по возрастанию. После получения желаемой длины отрезка от пользователя, рассчитанные значения медианы записываются в файл формата *.csv*. На основе данных для выбранной пользователем функциональной зависимости, рассчитываются коэффициенты и строятся графики с последующим их сохранением в формате *png*. В частности, для гиперболической зависимости («интенсивность-плотность») используется библиотека *seaborn*, которая позволяет построить математическую модель с учетом ошибки. Нахождение коэффициентов функции, определяющей зависимость, происходит через метод наименьших квадратов. Для экспоненциальной зависимости («скорость-плотность») с помощью функции *curve_fit* метода *optimize* библиотеки *scipy*, осуществляется подбор кривой функции и ее коэффициентов под известный набор значений.

Таким образом, при применении скрипта *dependency_detection.py* облако точек уменьшается на основании выбора медианных значений. Далее по ним подбираются коэффициенты для функций экспоненты и параболы.

Результаты работы скрипта для зависимостей «скорость потока – плотность потока» и «плотность потока - интенсивность движения» до и после установки адаптивных светофорных объектов на рассматриваемом участке УДС представлены на рис. 8 а и б, соответственно.

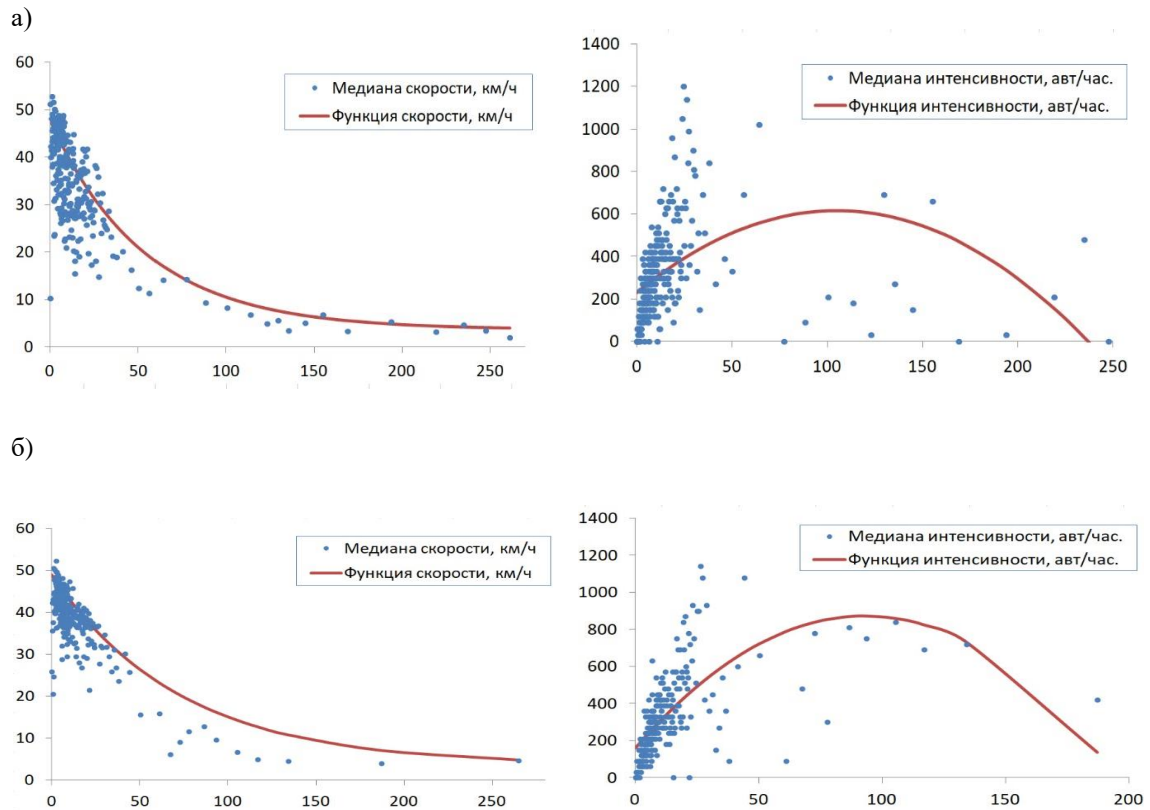


Рис. 8. Медианные облака значений и функциональная зависимость основной диаграммы транспортного потока для участка УДС г. Волгограда: а) до реализации АРДД; б) после реализации АРДД

Заключение

Моделирование в среде *SUMO* позволяет оценить эффект от принятия управленческих решений в области организации адаптивного регулирования дорожного движения на больших УДС, различной конфигурации на стадии планирования работ. Проведенные эксперименты показывают, что внедрение адаптивных средств регулирования дорожного движения даже на небольшой части пересечений городских УДС позволяет достичь значительных результатов на выбранном участке УДС (см. рис. 9).

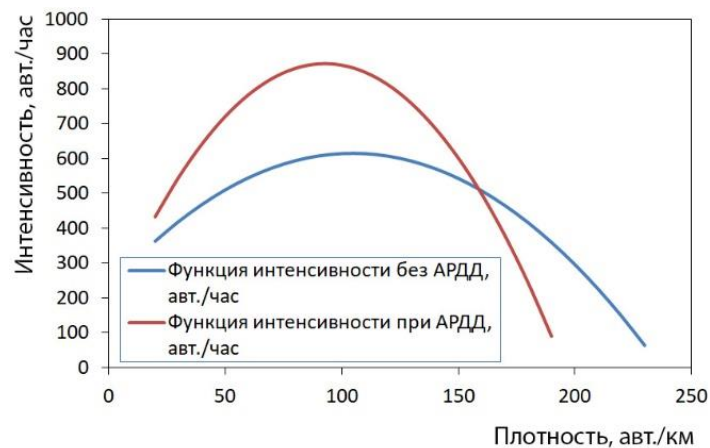


Рис. 9. Результаты моделирования эффективности функционирования участка УДС г. Волгограда до и после применения адаптивных средств регулирования трафика

В частности, можно сделать следующие выводы:

Реализация адаптивных светофорных объектов на 30-40 % светофорных объектов УДС дает увеличение пропускной способности сети в целом на 46-48 % в зависимости от конфигурации дорожной сети;

Повышение пропускной способности УДС при реализации адаптивных средств регулирования дорожного движения обеспечивает рост средней скорости движения транспортных средств на 25-35 % при плотности движения, соответствующей максимальной пропускной способности.

Моделирование в среде *SUMO* на микроуровне позволяет осуществлять оценку эффекта от применения адаптивных светофорных объектов учитывая поведение большого количества независимых транспортных средств, поведение которых определяется индивидуальными характеристиками. Данное обстоятельство позволяет обрабатывать значительные массивы данных, используя информацию реальной интенсивности движения с датчиков индукционных петель.

Разработанный скрипт *dependency_detection.py* является эффективным дополнением к инструментам *SUMO*, позволяющим наглядно представить результаты моделирования, а также получить функциональные закономерности основного уравнения транспортного потока.

Следует также отметить, что моделирование адаптивных средств регулирования дорожного движения в *SUMO* позволяет оценить затраты времени транспортных средств и, как следствие снижение нагрузки на экологию.

Список источников

1. Chang Y. S. Population Density or Populations Size. Which Factor Determines Urban Traffic Congestion? // *Sustainabilit.* 2021. Vol. 13, No. 8. P. 4280. DOI : <http://doi.org/10.3390/su13084280>.
2. Salini S., Ashalatha R. Analysis of traffic characteristics of urban roads under the influence of roadside frictions // *Case Studies on Transport Policy.* 2020. Vol. 8, No.1. P. 94-100.
3. Skorobogatchenko D. Computer-Aided Evaluation of Individual Traffic Road Safety Along a Given Route Within the Framework of the “Driver-Car-Road-Environment” System / D. Skorobogatchenko, V. Borovik, R. Chugumbaev, A. Borovik // *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. CIT&DS 2021. Communications in Computer and Information Science.* 2021. Vol. 1448. P. 385–404. DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-030-87034-8_28.
4. Skorobogatchenko D. A., Borovik V. V., Frolovichev A. I. Assessment automation of road traffic safety with account for road conditions of an individual itinerary // *Journal of Physics: Conference Series.* 2021. Vol. 2091, 012051. DOI: [10.1088/1742-6596/2091/1/012051](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2091/1/012051).
5. Towards a distributed and infrastructure-less vehicular traffic management system / Ademar T. Akabane [et al.] // *Computer Communications.* 2020. Vol. 151. P. 306–319. DOI : doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.002.
6. A memetic algorithm for real world multi-intersection traffic signal optimisation problems / N. R. Sabar [et al.] // *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* 2017. Vol. 63. P. 45–53. DOI : <http://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.04.021>.
7. Miller A. J. Settings for fixed-cycle traffic signals // *The Journal of the Operational Research Society,* 1963. Vol. 14. P. 373–386.
8. A study of the travel time of intersections by vehicles using computer vision / V. Shepelev, A. Glushkov, Z. Almetova, V. Mavrin // *Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems.* 2020. P. 653–658.
9. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment / Y. Feng, K. L. Head, S. Khoshmaghani, M. Zamanipour // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* 2015. Vol. 55. P. 460–473.
10. Eom M., Kim BI. The traffic signal control problem for intersections: a review // *European Transport Research Review,* 2020. Vol. 12, 50. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00440-8>.

11. Qadri S.S.S.M., Gökçe, M.A., Öner, E. State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities // *European Transport Research Review*, 2020. Vol. 12, 55. DOI : <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00439-1>.
12. Андронов Р. В., Леверенц Е. Э. Применение статистического моделирования для оценки эффективности адаптивного регулирования и реконструкции пересечений улично-дорожной сети // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2021. №3 (97). С. 40-49.
13. Задорожный В. Н., Юдин Е. Б. Обзор программ моделирования транспортных потоков // *Динамика систем, механизмов и машин*. Омск : ОмГТУ, 2012. № 1. С. 254–257.
14. Бабичева Т. С. Транспортные потоки: математическое и имитационное моделирование // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2015. Т. 2, №. 11. С. 290-296.
15. Hoogendoorn S. P. State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling / S. P. Hoogendoorn, P. H. L. Bovy // *Delft University of Technology*. Delf, The, 2001. P. 283–303.
16. Immers, L. Traffic flow theory / L. Immers, S. Logghe // *Curricular Material*, may 2002. by Katholieke Universiteit Leuven.
17. Остринская Л. И., Данилова А. С. Возможности компьютерного моделирования в области транспортных сетей. анализ автоматизированных информационных систем построения транспортных моделей // *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции*. 2019. С. 434-437.
18. Review of Virtual Traffic Simulation and Its Applications / Cui-juan Liu, Zhen Liu, Yan-jie Chai, Tingting Liu // *Journal of Advanced Transportation*. 2020. Vol. 2020, Article ID 8237649. P. 1-9. DOI : <https://doi.org/10.1155/2020/8237649>
19. Шамлицкий Я. И., Охота А. С., Мироненко С. Н. Моделирование транспортных потоков в среде AnyLogic // *Программные продукты и системы*. 2018. Т. 31. № 3. С. 632–635. DOI: 10.15827/0236-235X.031.3.632-635.
20. Аземша С. А. , Капитанов П. И., Евланов В. И. Повышение эффективности дорожного движения на перекрестках внедрением адаптивного регулирования // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт*. 2020. № 2(41). С. 37-41. EDN : FQVDXS.
21. Андронов С. А. Сравнение эффективности адаптивных алгоритмов светофорного регулирования в среде Anylogic // *Программные продукты и системы*. 2019. Т. 32. № 1. С. 150–158. DOI: 10.15827/0236-235X.125.150-158.
22. Разработка микроскопической модели транспортных потоков города в системе SUMO / Е. Р. Майоров, И. Р. Лудан, Д. Д. Мотта, О. Н. Сапрыкин // *Сборник трудов ИТНТ-2019. САМАРА, 21–24 мая 2019 года. Самара: Новая техника, 2019. С. 743-747. EDN : SMIIQD*.
23. Зиновьев И. В. Алгоритм адаптивного управления светофорами на основе алгоритма роя частиц // *Научный журнал*. 2016. №4 (5). 2016, С. 26-30.