

Научная статья

УДК 519.876.5

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-129-138>

EDN:XYELRO



Разработка программных средств адаптивного управления дорожным трафиком и оценка их эффективности

✉ Дмитрий Александрович Пелих¹, pelih.da@sut.ru✉ Наталья Викторовна Шаталова², shatillen@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена тем, что, с одной стороны, развитие искусственного интеллекта и информационных технологий в целом открывает новые перспективы внедрения в процессы дорожного регулирования инновационных методик и алгоритмов управления трафиком, а с другой – в большинстве существующих решений присутствует ряд ограничений: статические модели не адаптивны к изменениям интенсивности потока автомобилей и не рассчитаны на эффективную работу в условиях пиковых нагрузок, а динамические обладают медленной реакцией на непредсказуемые ситуации, например, возникновение аварий или массовые мероприятия, а также их применение ограничено особенностями регионов.

Целью данной работы является выбор граничных параметров разработанного алгоритма и анализ его эффективности по сравнению с другими методами управления дорожным трафиком. В ходе исследования были использованы **методы** теории массового обслуживания и теории графов для модели дорожного движения, мультиагентный подход и обучение с подкреплением для алгоритма управления фазами светофоров, для оценки эффективности системы – имитационное моделирование.

Решение научной задачи: сформированы функциональные требования разработанного программного обеспечения; проведена серия экспериментов по имитационному моделированию процесса управления дорожным трафиком при различных сценариях; реализована имитационная модель участка дороги Невского района Санкт-Петербурга; проведен ряд экспериментов по моделированию дорожной ситуации и оптимизации длительности фаз светофора, а также выявлению граничных параметров эффективно функционирования системы; проведен сравнительный анализ методов управления дорожным трафиком.

Научная новизна работы определяется авторским подходом к комбинированию способов управления дорожным трафиком и формированию алгоритма, выявляющего наиболее подходящие методы для текущей дорожной ситуации.

Практическая значимость разработанного решения состоит в том, что оно более эффективно по сравнению с другими, рассматриваемыми в статье, алгоритмами и может быть использовано для управления автомобильным трафиком и анализа эффективности дорожной сети.

Ключевые слова: мультиагентные системы, управление дорожным трафиком, имитационное моделирование, оценка эффективности

Ссылка для цитирования: Пелих Д.А., Шаталова Н.В. Разработка программных средств адаптивного управления дорожным трафиком и оценка их эффективности // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 129–138. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-129-138. EDN:XYELRO

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-129-138>

EDN:XYELRO

Adaptive Traffic Management Software Development and Evaluation of Its Effectiveness

 **Dmitriy A. Pelikh**¹✉, pelih.da@sut.ru **Natalia V. Shatalova**², shatillen@mail.ru

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Annotation

The relevance of this research is due to the fact that, on the one hand, the development of artificial intelligence and information technologies in general opens up new prospects for the implementation of innovative traffic management methods and algorithms in road regulation processes, and on the other hand, most existing solutions are not adaptive to changes in the intensity of vehicle traffic and are not designed to operate effectively under peak loads.

The purpose of this work is to select the boundary parameters of the developed algorithm and analyze its effectiveness in comparison with other methods of traffic control.

The paper uses **methods** of queuing theory and graph theory for the traffic model, and also applies a multi-agent approach and reinforcement learning for the algorithm of traffic light phases control, simulation modeling is used to evaluate the system efficiency.

Results. In the course of solving the scientific problem, the functional requirements of the developed software were formed. A series of experiments was conducted on the simulation of the traffic management process under various scenarios. A simulation model of a road section in the Nevsky District of St. Petersburg was implemented. A number of experiments were conducted on the simulation of traffic situations and the optimization of the duration of traffic light phases, as well as the identification of the boundary parameters for the effective functioning of the system. A comparative analysis of traffic management methods was conducted.

The scientific novelty of the work is determined by the author's approach to combining methods of road traffic management and creating an algorithm that identifies the most suitable methods for the current traffic situation.

The practical significance of the developed solution lies in the fact that it is more effective than other algorithms considered in the article and can be used for managing road traffic and analyzing the efficiency of the road network.

Keywords: multi-agent systems, traffic management, simulation modeling, and performance evaluation

For citation: Pelikh D.A., Shatalova N.V. Adaptive Traffic Management Software Development and Evaluation of Its Effectiveness. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):129-138. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-129-138. EDN:XYELRO

Введение

В современных реалиях все большей проблемой мегаполисов становится возникновение заторов на дорогах. Помимо развития дорожной инфраструктуры в качестве важного фактора, влияющего на эту проблему, выступает управление светофорными объектами. В [1] приведен анализ некоторых существующих интеллектуальных светофорных комплексов. В [2] рассматриваются технологиче-

ские основы интеллектуальных транспортных систем. Целью данной работы является описание процесса разработки программных компонентов автоматической системы управления дорожным трафиком и оценка их эффективности путем проведения серии имитационных экспериментов. Основным параметром качества системы выбрано количество автомобилей в очереди на каждом из дорожных направлений в определенный момент времени.

Адаптивные системы управления дорожным движением в реальном времени собирают данные о состоянии трафика и динамически корректируют параметры работы светофоров. Эффективность таких систем напрямую зависит от качества алгоритмов, лежащих в их основе, и точности оценки их работы до внедрения в реальных условиях.

Функционал существующих систем в области управления дорожной инфраструктуры сильно продвинулся в последнее время, однако присутствует ряд ограничений, среди которых можно выделить следующие:

1) классические статические модели управления трафиком, такие как модель Вебстера, вообще не адаптированы к условиям, когда входной поток автомобилей на перекрестке превышает его пропускную способность, то есть эффективно использоваться в условиях дорожных заторов;

2) динамические методы уже более специализированы к решению данной проблемы, однако, во-первых, использование систем, которые их реализуют, ограничено особенностями регионов, а во-вторых, эти системы обладают низкой адаптивностью к непредсказуемым ситуациям, например, возникновению аварий или массовым мероприятиям;

3) существующие системы, как правило, используют узкий набор методов, пренебрегая другими, которые, в свою очередь, могут быть полезны в определенных дорожных ситуациях;

4) текущие решения направлены на реализацию некоторой определенной задачи и не позволяют организовать управление дорожной инфраструктурой, принимая во внимание совокупность факторов, например, производить автоматизированный выбор вариантов внедрения новых объектов дорожного полотна на основе моделирования трафика в каждом из вариантов;

5) управление дорожной инфраструктурой ограничено масштабом небольших дорожных участков (не считая специализированных проектов, таких как цифровой двойник Сингапура) и не реализуется в рамках целых городов или их районов.

На основании вышеперечисленных ограничений существующих систем в процессе разработки программного обеспечения управления дорожной инфраструктурой ставятся следующие задачи:

- выбор показателей качества программных средств управления дорожным трафиком и разработки механизмов их оценки;

- проведение экспериментов по имитационному моделированию системы управления дорожным трафиком при различных сценариях с целью определения граничных условий эффективности системы $\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$, минимальной и максимальной интенсивностей поступающих в модель транспортных средств (ТС);

- анализ эффективности методов управления дорожным трафиком.

Описание разработанных программных средств управления дорожным движением

Реализация управления дорожным трафиком производится с помощью построенного авторами алгоритма, основанного на мультиагентном подходе. Каждому перекрестку назначается программный агент, реализующий поиск распределения длительности фаз, соответствующего самой большой пропускной способности этого перекрестка. В зависимости от сложности перекрестка и от его степени насыщенности в данный момент используются разные методы поиска, для незагруженных участков – статические методы, такие как метод Вебстера, не требующие больших ресурсов на расчет, а для направлений, в которых образуются заторы, поиск длительности фаз производится с помощью более сложных алгоритмов оптимизации. Степень насыщенности определяется как отношения интенсивности поступающих на определенное направление автомобилей к пропускной способности перекрестка в данном направлении. Далее агенты взаимодействуют посредством передачи сообщений и принимают решение о выборе конечного расписания длительности фаз для каждого из перекрестков на основании минимизации значения функции ожидания автомобилями проезда перекрестка для всей дорожной сети. Более подробно данный алгоритм описан в других работах авторов, например, в [3]. В процессе проектирования также были использованы модели, описанные в [4–6]. Для тестирования и оценки существующих и внедрения принципиально новых алгоритмов разработаны программные средства управления дорожным движением. Подсистема обработки данных предоставляет возможность импорта в формате CSV (аббр. от англ. Comma-Separated Values) или ручного задания пользователем значений параметров как дорожной сети, так и дорожного движения.

В первую группу параметров входят:

- количество направлений движения (подразумевается отрезок дороги, ограниченный соседними перекрестками или точками обрыва модели);
- длина каждого из направлений, измеряемая в метрах;
- количество полос в каждом направлении;
- количество перекрестков с указанием входящих в них направлений.

Пример конфигурации участка дорожной сети, сформированной пользователем «вручную» приведен на рисунке 1. Параметры дорожного движения уже зависят от времени и могут быть указаны отдельно для каждого дня или времени суток. Они должны быть определены дискретным набором значений (рисунок 2а) для заданных промежутков времени (t). В эту группу параметров входят интенсивность ТС, вероятности поворота, длительности фаз светофоров.

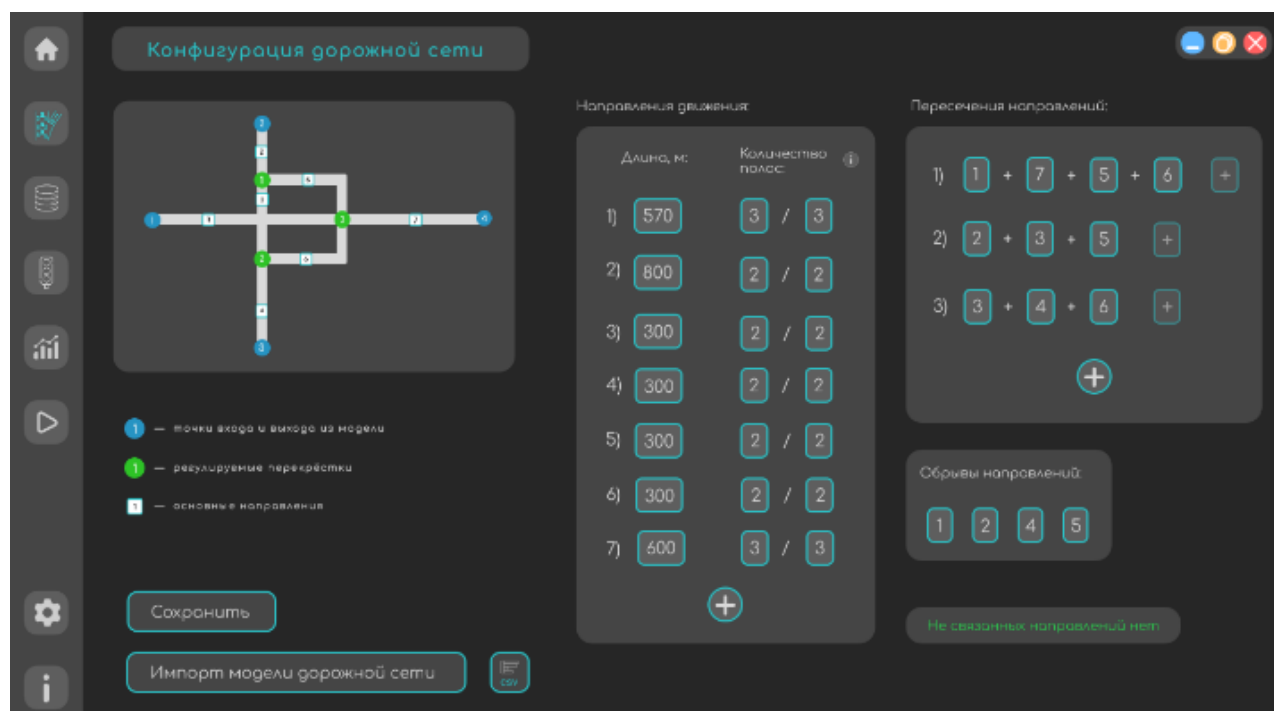


Рис. 1. Конфигурация участка дорожной сети

Fig. 1. Configuration of a Section of the Road Network

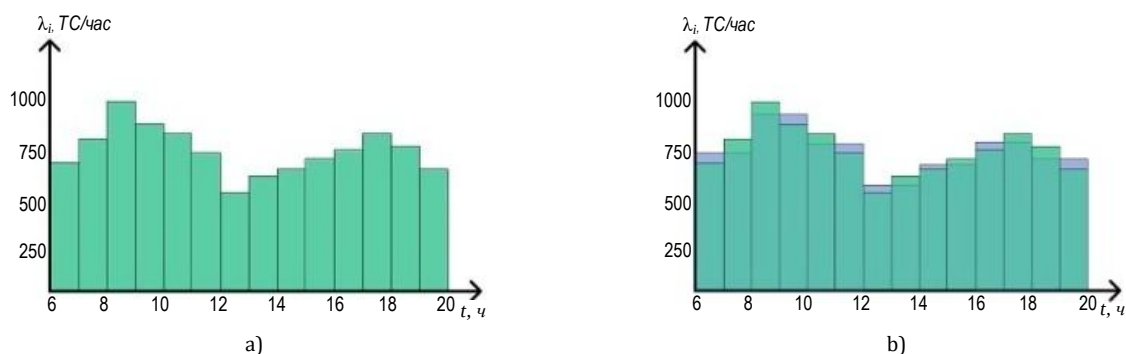


Рис. 2. Пример распределения интенсивности ТС в течение дня

Fig. 2. An Example of the Distribution of Vehicle Intensity throughout the Day

Интенсивность ТС, поступающих на каждое из направлений (ТС/час). При импорте данных система позволяет уменьшить частоту дискретизации этого параметра (например, для уменьшения нагрузки на аппаратную часть устройства, на котором происходит развертывание программы) путем приведения входящих в новый интервал значений к среднему арифметическому (рисунок 2б). Также присутствует функционал заполнения случайно возникших пропусков значений путем интерполяции методом скользящего среднего.

Вероятности поворота. Указываются для каждой пары направлений на перекрестке (вероятность разворота определяется путем вычитания из единицы суммы указанных значений). В случае наличия данных о дорожных ситуациях за прошедший период времени или полученных в ходе проведения имитационных экспериментов вероятности

могут быть рассчитаны путем нормирования к единице количества ТС, проехавших по каждой паре направлений.

Длительности фаз светофоров. Пользователем указываются (до запуска процесса моделирования) только первоначальные (референсные) значения, в дальнейшем этот показатель оптимизируется (например, с целью минимизации количества ТС в очереди).

После запуска система в автоматизированном режиме предлагает оптимальное распределение длительности фаз светофора и отображает предполагаемое в определенный момент времени дорожное состояние (количество ТС на каждом из направлений). Процесс формирования результирующих данных основан на применении мультиагентного подхода, принципы которого изложены в [7–10], а

также обучении с подкреплением [11–12]. Также выходные данные можно использовать, например, для кластерного анализа с целью выявления узких мест и оптимизации движения [13].

Проведение экспериментов по выявлению граничных параметров

Для проведения экспериментов по выявлению граничных параметров, при которых система функционирует эффективно, построена имитационная

модель участка дорожной сети (топология представлена на рисунке 3). Модель имеет 18 основных направлений, 8 регулируемых перекрестков и 10 точек входа и выхода ТС из модели, представляющих собой обрыв дороги. Система предоставляет возможность указания интенсивности поступающих и убывающих в эти точки модели автомобилей в виде дискретного для каждого из промежутков времени значений. На рисунке 4 приведена модель данного участка дорожной сети, для визуализации нанесенная на карту.

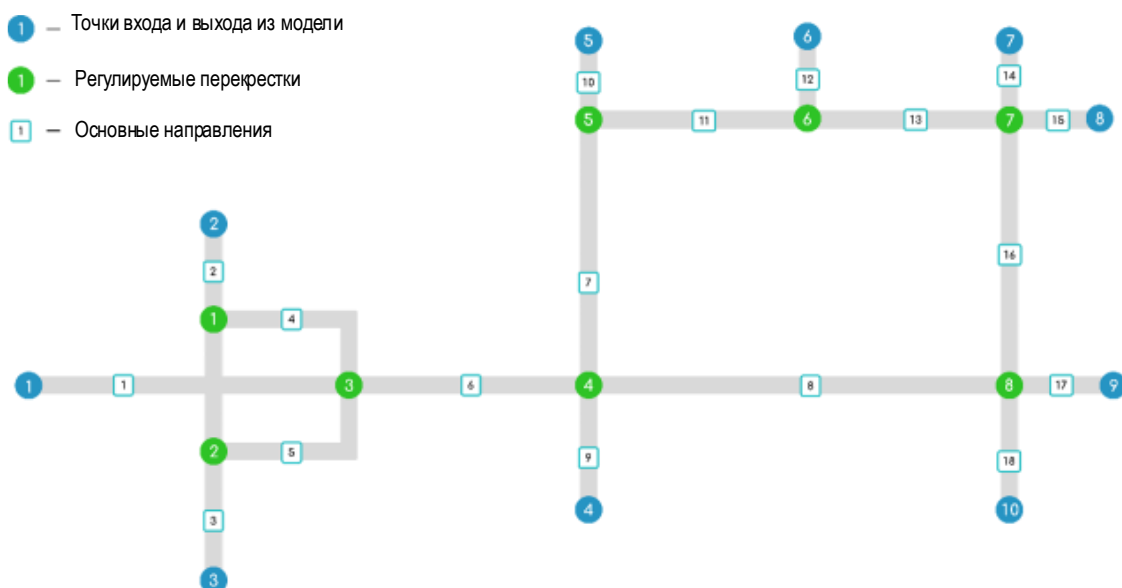


Рис. 3. Топология построенного участка дорожной сети

Fig. 3. Topology of the Constructed Section of the Road Network

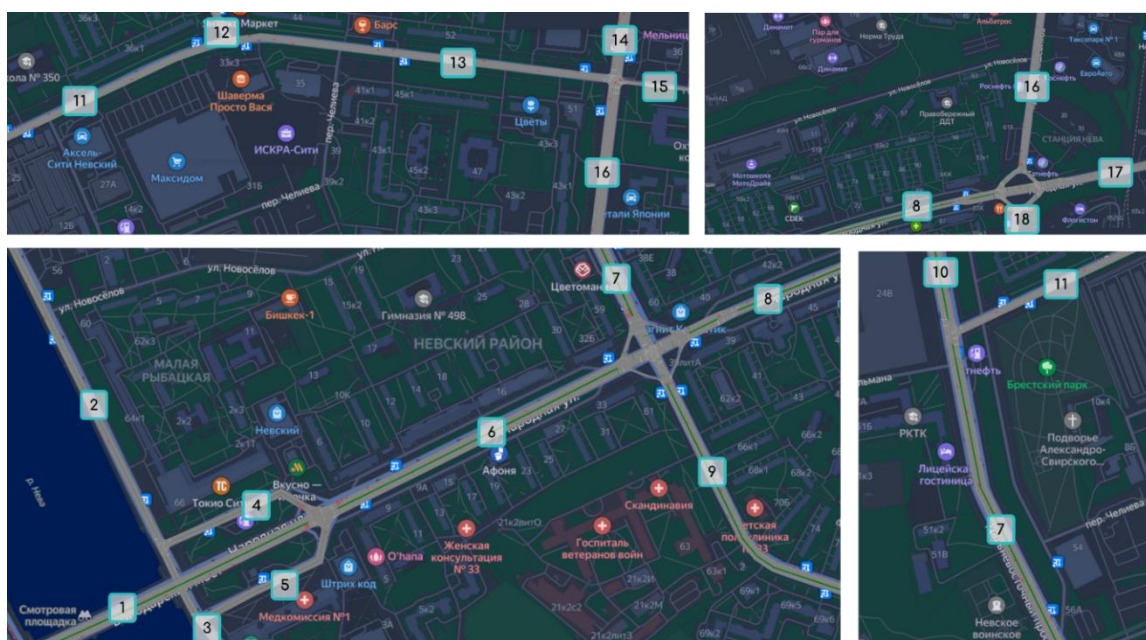


Рис. 4. Моделируемый участок дорожной сети

Fig. 4. The Simulated Section of the Road Network

На рисунке 5 приведен фрагмент логической схемы моделируемого участка дорожной сети, определяющей возможные маршруты следования ТС и отображающей количество проехавших через каждое направление автомобилей. В качестве входных данных модели выступают длины направлений дорог (участков между перекрестками или точками входа), количество полос по каждому из направлений (таблица 1) и интенсивность поступающих в модель ТС (таблица 2). Исходные данные

получены посредством парсинга в сети интернет. Для проведения экспериментов были выбраны три момента времени (T_1 , T_2 , T_3), входные данные которых примерно соответствуют дорожной ситуации на моделируемом участке в 7:00, 7:30 и 8:00 буднего дня. Под выходными данными принимается распределение длительности фаз светофоров (t_{green}/t_{red}) и количество ТС в очереди в момент времени T_i (таблица 2).

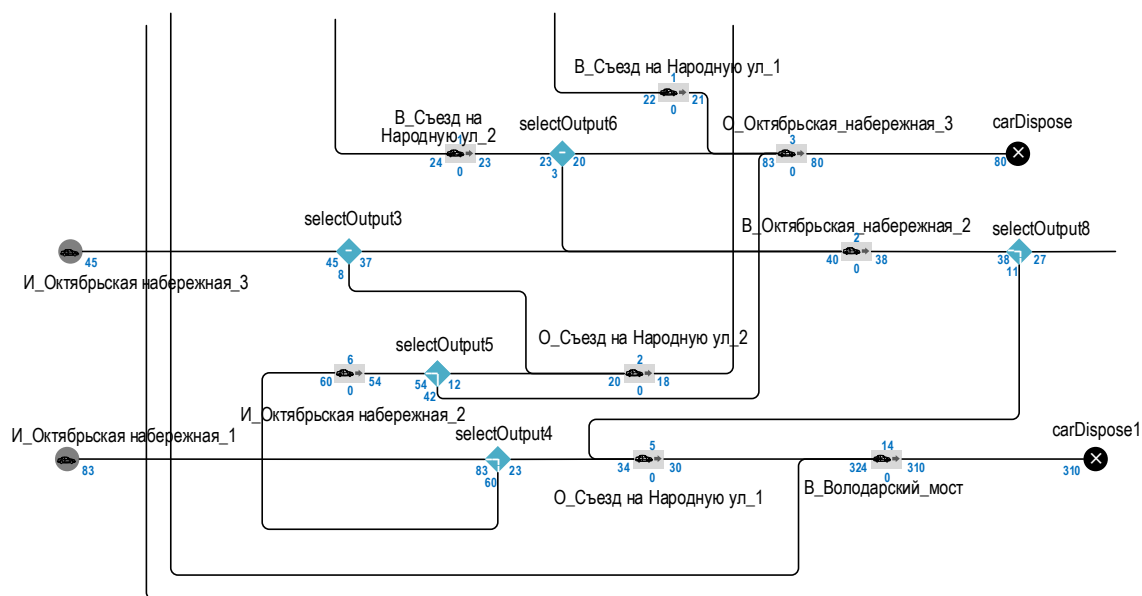


Рис. 5. Фрагмент логической схемы моделируемого участка дорожной сети

Fig. 5. Fragment of the Logical Scheme of the Simulated Road Network Section

Эксперименты производились для отличающийся последовательности интенсивности поступающих в модель ТС, при этом:

$$\lambda_{cp}(T_1) < \lambda_{cp}(T_2) < \lambda_{cp}(T_3),$$

где $\lambda_{cp}(T_i)$ – среднее по всем направлениям значение интенсивности для каждого момента времени T_i .

Распределение длительностей фаз светофоров (t_{green}/t_{red}) производилось системой в автоматическом режиме.

ТАБЛИЦА 1. Входные данные и количество ТС в очереди в момент времени T_i

TABLE 1. Input Data and the Number of Vehicles in the Queue at Time T_i

Направление	Длина, м	Количество полос (основного / встречного движения)	Количество ТС в очереди в момент времени T_i		
			T_1	T_2	T_3
1	570	3/3	10	20	27
2	800	2/2	5	11	7
3	300	2/2	4	12	9
4	300	2/2	3	5	7
5	300	2/2	4	7	11

Направление	Длина, м	Количество полос (основного / встречного движения)	Количество ТС в очереди в момент времени T_i		
			T_1	T_2	T_3
6	600	3/3	23	56	63
7	900	3/3	20	45	48
8	1000	2/2	36	86	97
9	760	3/2	18	34	46
10	200	3/3	9	13	20
11	900	2/2	5	6	8
12	100	2/2	3	4	3
13	680	2/2	10	8	10
14	200	3/3	6	7	9
15	200	1/1	4	3	5
16	780	3/3	16	21	33
17	400	3/3	17	18	27
18	300	3/3	22	27	32
Сумма ТС в очереди по всем направлениям			215	383	462

ТАБЛИЦА 2. Данные модели по точкам входа и выхода из модели и регулируемым перекресткам

TABLE 2. Model Data for Entry and Exit Points and Controlled Intersections

Точки входа и выхода из модели	Интенсивность поступающих в модель ТС, ТС/ч			Регулируемые перекрестки	Распределение длительности фаз светофоров (t_{green}/t_{red}) в момент времени T_i		
	T_1	T_2	T_3		T_1	T_2	T_3
1	300	400	500	1	60/60	65/60	70/60
2	340	380	480	2	60/60	60/55	60/55
3	320	410	490	3	60/40	60/30	70/40
4	540	670	810	4	70/60	80/60	90/60
5	630	780	910	5	60/60	60/55	70/55
6	320	430	680	6	40/40	45/40	50/40
7	710	920	1180	7	90/35	110/35	110/40
8	90	120	210	8	80/50	90/50	95/50
9	930	1190	1380				
10	380	680	790				

Анализ эффективности процесса корректировки длительности фаз

Для анализа эффективности процесса корректировки длительности фаз проведен ряд экспериментов с помощью имитационной модели, представленной в предыдущем разделе, а используемые входные данные представлены в таблицах 1 и 2.

Корректировка длительности фаз светофоров производилась тремя различными способами:

- с помощью генетического алгоритма оптимизации [14–15]; результаты приведены на рисунке 6 (в левой части);
- посредством алгоритма оптимизации OptQuest от компании OptTek; данное решение реализовано в программе AnyLogic при использовании библио-

теки дорожного движения [16], результаты также приведены на рисунке 6 (в правой части);

– при помощи алгоритма, использованного реализуемой в рамках текущей работы системой (описан выше).

Результаты процесса корректировки длительности фаз светофоров при помощи разрабатываемого алгоритма также представлены в таблице 2. Проведены эксперименты по моделированию дорожной ситуации в различное время (T_1, T_2, T_3). Результаты моделирования в момент времени T_1 для различных методов оптимизации приведены на рисунке 7. В качестве критерия оптимизации выступает среднее время ожидания автомобилем проезда перекрестка. В отображаемой сцене модели красным цветом представлена динамическая картина автомобилей, движущихся по дорожной сети. На правой панели отображена статистика хода эксперимента, в частности время в модели и нагрузка на аппаратную часть.

	Текущее	Лучшее
Итерация	104	7
Функционал	0	0
Параметры	Copy best	
phase1_duration	19,28	67,571
phase2_duration	37,861	47,489
phase3_duration	46,705	21,74
phase4_duration	53,252	88,892
phase5_duration	25,7	82,363
phase6_duration	69,044	15,189

Рис. 6. Результаты оптимизации с помощью генетического алгоритма и алгоритма OptQuest

Fig. 6. Optimization Results Using the Genetic Algorithm and the OptQuest Algorithm

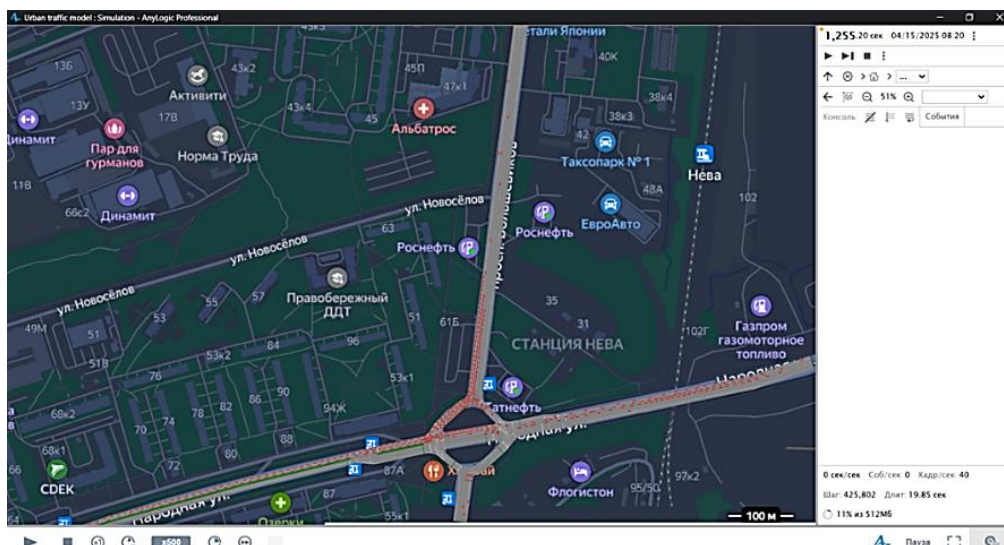


Рис. 7. Результаты моделирования, оптимизация с помощью разрабатываемого алгоритма

Fig. 7. Simulation Results and Optimization Using the Developed Algorithm

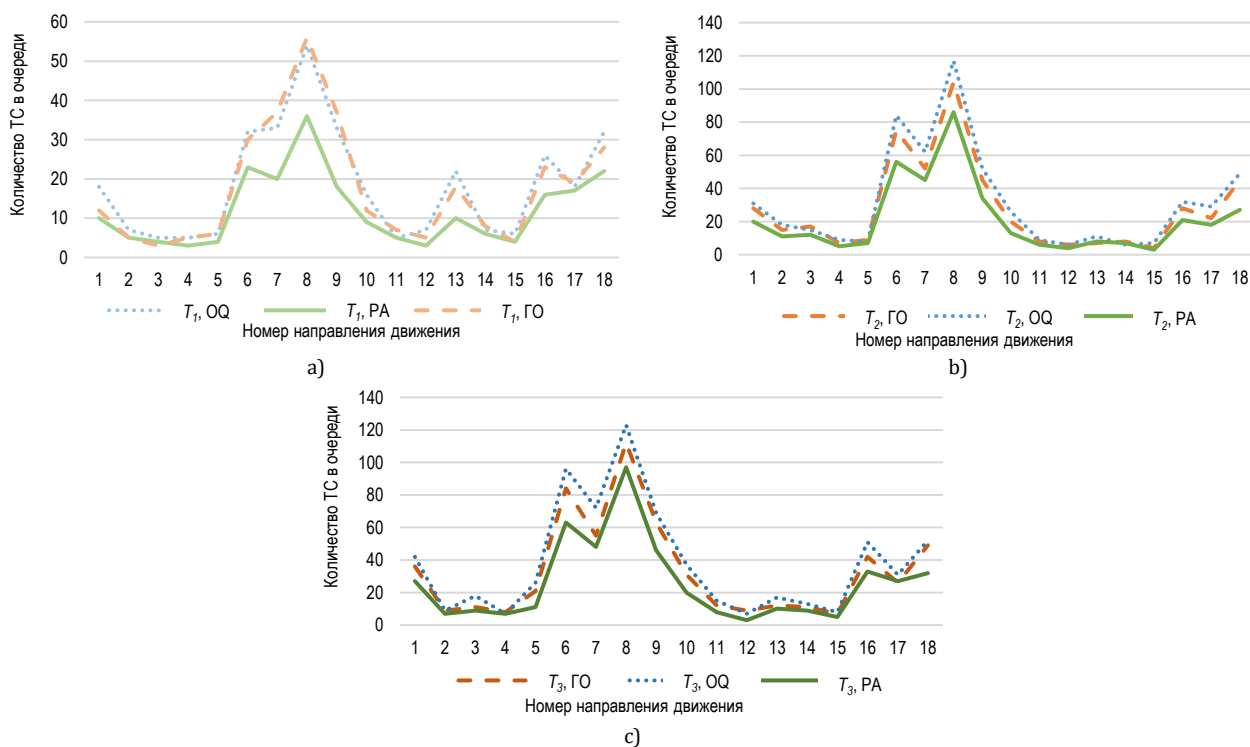
В качестве основного параметра оценки эксперимента используется средняя длина очереди, а именно среднее значение количества автомобилей, находящихся перед перекрестками по каждому из

направлений в определенные моменты времени T_1 – T_3 . Результаты эксперимента приведены в таблице 3 и на рисунке 8.

ТАБЛИЦА 3. Результаты эксперимента

TABLE 3. The Results of the Experiment

Направление	Количество ТС в очереди в момент времени T_i								
	Генетический оптимизатор			OptQuest			Разрабатываемый алгоритм		
	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
1	12	28	36	18	31	42	10	20	27
2	5	15	9	7	18	9	5	11	7
3	3	17	11	5	15	18	4	12	9
4	5	7	8	5	9	7	3	5	7
5	6	9	21	6	8	26	4	7	11
6	30	75	84	32	84	96	23	56	63
7	37	52	55	33	62	72	20	45	48
8	56	104	112	54	117	123	36	86	97
9	37	45	63	33	52	69	18	34	46
10	12	20	31	16	26	37	9	13	20
11	7	8	12	5	9	15	5	6	8
12	5	6	9	7	6	7	3	4	3
13	18	7	12	22	11	17	10	8	10
14	8	8	11	7	6	13	6	7	9
15	4	4	7	6	7	8	4	3	5
16	23	28	42	26	32	51	16	21	33
17	19	22	26	18	29	31	17	18	27
18	28	45	49	32	49	52	22	27	32
Сумма ТС в очереди по всем направлениям	315	500	598	332	571	693	215	383	462

Рис. 8. Результаты эксперимента в момент времени: а) T_1 ; б) T_2 ; в) T_3 Рис. 8. The Results of the Experiment, Time Point: а) T_1 ; б) T_2 ; в) T_3

Заключение

Проведенное моделирование позволяет провести количественный анализ управления дорожным движением. Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о граничных условиях: система эффективна при значениях интенсивности поступающих в модель ТС в интервале от $\lambda_{\min} \approx 300$ до $\lambda_{\max} \approx 1500$ автомобилей в час.

В случае, если $\lambda < \lambda_{\min}$, методы, используемые в разработанном алгоритме, избыточны и при этом обеспечивают высокую нагрузку на аппаратную часть устройства, на котором проводится моделирование. Таким образом, достаточно статических методов регулирования трафика. Для решения данной проблемы в перспективе возможно внесение корректировки в алгоритм управления, а именно отключение агентов, реализующих такие методы, если $\lambda_1 < \mu_1$.

В случае, если $\lambda > \lambda_{\min}$, происходит «перегрузка» дорожной сети и дальнейшее увеличение λ ведет

только к снижению ее пропускной способности. Для решения данной проблемы система предусматривает внесение изменений в конфигурацию дорожной сети, например, увеличения количества полос, формирование новых съездов и развязок, что и подразумевает возможность планирования дорожной инфраструктуры на основании анализа трафика ТС.

Исходя из проведенных экспериментов, можно сделать вывод, что корректировка длительности фаз светофоров при помощи одного только генетического алгоритма не так эффективна, как при помощи разработанного алгоритма. Сторонний алгоритм оптимизации, в качестве которого выступал OptQuest, также не так эффективен. Таким образом, разработка адаптивных алгоритмов, включающих в себя определенную комбинацию разных методов оптимизации параметров дорожного движения может быть эффективна в практическом применении систем управления транспортной инфраструктурой.

Список источников

1. Малыгин И.Г. Интеллектуальные светофорные комплексы и пути внедрения их в мегаполисах // Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии построения когнитивных транспортных систем» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 30–31 мая 2018 г.). СПб.: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2018. С. 15–20. EDN:XRWWTJ
2. Шаталова Н.В., Орешкина А.Д. Технологические принципы интеллектуальных транспортных систем // IV Международная научно-практическая конференция по направлению НТИ Автонет «Перспективные транспортные технологии: материалы» (Екатеринбург, Российская Федерация, 8 июля 2025 г.). М.: Московский Политех, 2025. С. 159–164. EDN:LBQFJM
3. Бондаренко И.Б., Пелих Д.А. Проектирование архитектуры мультиагентной системы в решении частных задач городского управления // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 2. С. 48–51. EDN:DRPBFF
4. Коновалова Т.В., Надирян С.Л., Изюмский А.А., Коцурба С.В. Элементы дорожной инфраструктуры и влияние их на безопасность дорожного движения // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies. 2022. Т. 12. № 2. С. 49–68. DOI:10.12731/2227-930X-2022-12-2-49-68. EDN:OKEKTL
5. Зиарманд А.Н., Хаханов В.И. Модели и методы мониторинга и управления транспортом // Радиоэлектроника и информатика. 2016. № 3. С. 64–80.
6. Елькин Д.М., Вяткин В.В. На пути к интернету вещей в управлении транспортными потоками: обзор существующих методов управления дорожным движением // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 5(207). С. 100–113. DOI:10.23683/2311-3103-2019-5-100-113. EDN:XZWTPC
7. Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В. Инструментальные средства для открытых сетей агентов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 3. С. 106–124. EDN:IMQNUP
8. Родзина Л.С. Прикладные многоагентные системы. Программирование на платформе JADE. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co, 2011. 174 с.
9. Маслобоев А.В. Модели и алгоритмы взаимодействия программных агентов в виртуальной бизнес-среде развития инноваций // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2009. Т. 12. № 2. С. 224–234. EDN:KPYRAD
10. Душкин Р.В. Многоагентные системы для кооперативных ИТС // Тренды и управление. 2021. № 1. С. 42–50. DOI:10.7256/2454-0730.2021.1.34169. EDN:ZNESUF
11. Шепелев В.Д., Альметова З.В., Моор А.Д., Берстенева В.И. Оптимизация работы адаптивных светофоров на основе использования машинного зрения // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2020. Т. 14. № 1. С. 189–196. DOI:10.14529/em200119. EDN:YWEJSZ
12. Расулмухамедов М.М., Ташметов К.Ш. Оптимизация управления транспортным потоком на перекрестках с помощью нейронной сети // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № S1(35-1):92–96. EDN:YBZSPQ
13. Поваляев Н.Д., Крылатов А.Ю., Шаталова Н.В. Методы кластерного анализа дорожных сетей для выявления узких мест и оптимизации движения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19. № 7. С. 34–40. DOI:10.36724/2072-8735-2025-19-7-34-40. EDN:AALGBX
14. Акопов А.С., Зарипов Е.А., Мельников А.М. Адаптивное управление транспортной инфраструктурой в городской среде с использованием генетического алгоритма вещественного кодирования // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18. № 2. С. 48–66. DOI:10.17323/2587-814X.2024.2.48.66. EDN:DTPMML
15. Haupt R.L., Haupt S.E. Practical genetic algorithms. Wiley, 2004.

16. Архангельский А.Н. Моделирование движения автомобиля в транспортном потоке на ЭВМ // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2020;1(07):26–31. DOI:10.30987/2658-6436-2020-1-26-31. EDN:EBPRMN

References

1. Malygin I.G. Problems and Perspectives of Using Intellectual Transport Safety Systems in the Megacities. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference on Technologies of Building Cognitive Transport Systems, 30–31 May 2018, St. Petersburg, Russian Federation*. St. Petersburg: N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences Publ.; 2018. p.15–20. (in Russ.) EDN:XRWWTJ
2. Shatalova N.V., Oreshkina A.D. Technological principles of intelligent transport systems. *Proceedings of the IVth International Scientific and Practical Conference on the NTI Avtonet "Promising Transport Technologies", 8 July 2025, Yekaterinburg, Russian Federation*. Moscow: Moscow Polytechnic University Publ.; 2025. p.159–164. (in Russ.) EDN:LBQFJM
3. Bondarenko I.B., Pelikh D.A. Design the Architecture of a Multi-Agent System in Solving Specific Urban Management Tasks. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2025;2:48–51. (in Russ.) EDN:DRPBFF
4. Konovalova T.V., Nadiryan S.L., Izyumsky A.A., Kotsurba S.V. Elements of Road Infrastructure and Their Impact on Road Safety. *International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies*. 2022;12(2):49–68. (in Russ.) DOI:10.12731/2227-930X-2022-12-2-49-68. EDN:OKECTL
5. Ziarmand A.N., Khakhanov V.I. Models and Methods of Transport Monitoring and Control. *Radioelectronics & Informatics*. 2016;3:64–80. (in Russ.)
6. Elkin D.M., Vyatkin V.V. Towards IoT in Traffic Control: Review of Existing Methods of Road Traffic Regulation. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2019;5(207):100–113. (in Russ.) DOI:10.23683/2311-3103-2019-5-100-113. EDN:XZWTPC
7. Gorodetskii V.I., Karsaev O.V., Samoilov V.V., Serebryakov S.V. Development Tools for Open Agent Networks. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2008;47(3):429–446. DOI:10.1134/S1064230708030131. EDN:LLHPLJ
8. Rodzina L.S. Applied Multi-Agent Systems. Programming on the JADE Platform. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co; 2011. 174 p. (in Russ.)
9. Masloboev A.V. Software Agents Interaction Models and Algorithms in the Virtual Business Environment of Innovation Development. *Vestnik of MSTU. Scientific Journal of Murmansk State Technical University*. 2009;12(2):224–234. (in Russ.) EDN:KPYRAD
10. Dushkin R.V. Multi-Agent Systems for Cooperative ITS. *Trends and Management*. 2021;1:42–50. (in Russ.) DOI:10.7256/2454-0730.2021.1.34169. EDN:ZNESUF
11. Shepelev V.D., Almetova Z.V., Moor A.D., Bersteneva V.I. Performance Optimization of Adaptive Traffic Lights Using Machine Vision. *Bulletin of South Ural State University, Series "Economics and Management"*. 2020;14(1):189–196. (in Russ.) DOI:10.14529/em200119. EDN:YWEJSZ
12. Rasulmukhamedov M.M., Tashmetov K.Sh. Optimization of traffic flow control at intersections using neural network. *Intellectual Technologies on Transport*. 2023;S1:92–96. (in Russ.) EDN:YBZSPQ
13. Povaliaev N.D., Krylatov A.Yu., Shatalova N.V. Methods of cluster analysis of road networks for bottleneck detection and traffic optimization. *T-Comm*. 2025;19(7):34–40. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2025-19-7-34-40. EDN:AALGBX
14. Akopov A.S., Zaripov E.A., Melnikov A.M. Adaptive Control of Transportation Infrastructure in an Urban Environment Using a Real-Coded Genetic Algorithm. *Business Informatics*. 2024;18(2):48–66. DOI:10.17323/2587-814X.2024.2.48.66. EDN:XSXDWU
15. Haupt R.L., Haupt S.E. *Practical genetic algorithms*. Wiley; 2004.
16. Arkhangel'sky A. Modeling the Car Motion in a Transport Flow on a Computer. Automation and modeling in design and management. 2020;1(7):26–31. (in Russ.) DOI:10.30987/2658-6436-2020-1-26-31. EDN:EBPRMN

Статья поступила в редакцию 28.10.2025; одобрена после рецензирования 18.03.2026; принята к публикации 09.06.2026

The article was submitted 28.10.2025; approved after reviewing 18.03.2026; accepted for publication 09.06.2026

Информация об авторах:

ПЕЛИХ
Дмитрий Александрович

ассистент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0001-6919-4822>

ШАТАЛОВА
Наталья Викторовна

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем организации транспортных систем Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
 <https://orcid.org/0000-0002-9781-067X>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.