

УДК 004.421:004.8
DOI

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ И ПРИОРИТЕТА ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

¹Подберёзкин А.А., ¹Борзенков А.М., ²Волков А.М., ¹Пронин Ц.Б., ¹Остроух А.В.

¹ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»,
Москва, e-mail: borzenkov03h@mail.ru;

²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

В условиях увеличения транспортной нагрузки и ограниченной пропускной способности улично-дорожной сети традиционные методы управления светофорами становятся неэффективными, особенно в городах с ограниченными ресурсами. Проблема усугубляется необходимостью строгого соблюдения нормативных требований, регламентирующих параметры работы светофорных объектов. Целью данного исследования является разработка и реализация математической модели адаптивного управления светофорным регулированием, обеспечивающей оптимизацию параметров циклов с учетом интенсивности транспортных и пешеходных потоков, а также требований безопасности и приоритета общественного транспорта. В работе использован метод генетических алгоритмов, позволяющий обрабатывать многомерное пространство допустимых решений. Разработанная модель учитывает длительность циклов, параметры фаз по направлениям движения, временные смещения для координации между перекрестками и ограничения, определенные нормативными документами. В результате проведенных численных экспериментов определены такие конфигурации светофорных программ, которые позволяют существенно сократить совокупные задержки транспортных средств и повысить пропускную способность сети без нарушения требований безопасности. Также проанализирована эффективность алгоритма в части учета приоритета общественного транспорта и возможности реализации «зеленой волны». Предложенное решение обеспечивает нормативную корректность, адаптивность к текущей дорожной ситуации и может быть масштабировано для применения в транспортных системах различных городов.

Ключевые слова: генетический алгоритм, нормативные требования, общественный транспорт, зеленая волна, адаптивное светофорное управление, управление дорожным движением

APPLICATION OF A GENETIC ALGORITHM FOR TRAFFIC SIGNAL OPTIMIZATION CONSIDERING REGULATORY REQUIREMENTS AND PUBLIC TRANSPORT PRIORITY

¹Podberezhkin A.A., ¹Borzenkov A.M., ²Volkov A.M., ¹Pronin Ts.B., ¹Ostroukh A.V.

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow,
e-mail: borzenkov03h@mail.ru;

²National Research University Higher School of Economics, Moscow

Under increasing traffic loads and limited capacity of urban road networks, traditional traffic signal control methods become inefficient, especially in cities with constrained infrastructure. The problem is aggravated by the necessity to strictly comply with regulatory requirements governing traffic signal parameters. The aim of this study is to develop and implement a mathematical model for adaptive traffic signal control that optimizes signal cycle parameters while considering the intensity of vehicular and pedestrian flows, safety requirements, and public transport priority. The study employs a genetic algorithm approach capable of handling a multidimensional space of permissible solutions. The developed model incorporates cycle duration, phase parameters for different directions, time offsets for intersection coordination, and constraints defined by regulatory documents. As a result of numerical experiments, configurations were identified that significantly reduce overall vehicle delays and increase network throughput without compromising safety standards. The algorithm's effectiveness in accounting for public transport priority and implementing a "green wave" was also analyzed. The proposed solution ensures regulatory compliance, adaptability to current traffic conditions, and scalability for application in transportation systems of various cities.

Keywords: genetic algorithm, regulatory requirements, public transport, green wave, adaptive traffic signal control, traffic management

Введение

В современных российских городах наблюдается устойчивый рост транспортных проблем, связанных с увеличением количества автомобилей и ограниченной пропускной способностью дорожной сети. Особенно остро эта ситуация проявляется в центральных районах небольших и средних городов, где статические светофорные программы не справляются с растущей нагрузкой. Тра-

диционные фиксированные циклы продолжительностью 90–120 с, не учитывающие реальную интенсивность движения, становятся основной причиной заторов в часы пик, снижения средней скорости транспорта и увеличения времени ожидания на перекрестках.

Мировой опыт показывает эффективность интеллектуальных транспортных систем, которые уже успешно работают не только в мегаполисах, но и в городах с насе-

нием менее 500 тыс. жителей. Однако в России их внедрение осложняется необходимостью строгого соблюдения нормативных требований ГОСТов, регламентирующих параметры работы светофоров. Эти требования, направленные на обеспечение безопасности дорожного движения, должны быть учтены в любых адаптивных алгоритмах.

Существующие методы ручной настройки светофорных программ становятся неэффективными в условиях многокритериальности задачи, когда необходимо одновременно учитывать потоки транспорта, пешеходов, приоритет общественного транспорта, нормативные ограничения и синхронизацию перекрестков. В этой связи разработка алгоритмических решений на основе методов искусственного интеллекта, в частности генетических алгоритмов, позволяет автоматизировать процесс оптимизации, минимизировать человеческий фактор и получать эффективные, нормативно-корректные решения для сложных транспортных систем [1–3].

Эффективное управление светофорным регулированием в городах является ключевым фактором обеспечения устойчивости транспортной системы, особенно в условиях ограниченной инфраструктуры и растущей нагрузки на улично-дорожную сеть. В традиционной практике светофорные циклы часто настраиваются вручную, что не позволяет оперативно учитывать динамику потоков, пешеходную активность и приоритет общественного транспорта. При этом действующие нормативные документы, в частности ГОСТ Р 52289-2004, жестко ограничивают возможные значения длительности фаз, что затрудняет гибкость решений [4].

В этой связи актуальной задачей становится формирование автоматизированного подхода, способного учитывать множество параметров – от геометрии перекрестков до интенсивности потоков и юридических ограничений. Особую важность представляет реализация приоритета для общественного транспорта без ущерба для безопасности движения и нормативных требований.

Цель исследования – разработка и реализация математической модели оптимизации параметров светофорного регулирования на базе генетического алгоритма, способного эффективно обрабатывать многомерное пространство допустимых решений с учетом действующих ГОСТов и параметров транспортных потоков.

Дополнительной задачей является обеспечение снижения совокупной задержки всех участников движения, в особенности автобусных маршрутов, а также реализация «зеленой волны» между несколькими перекрестками с учетом времени проезда. Полученное решение должно быть универсаль-

ным, масштабируемым и применимым в городах с ограниченными ресурсами для модернизации дорожной инфраструктуры.

Материалы и методы исследования

Для управления светофорными объектами разработана база данных с двумя таблицами. В таблице *intersections* хранятся параметры перекрестков: идентификатор, длительность цикла, зеленых фаз и время переключения. Таблица *constraints* содержит нормативные ограничения ГОСТ: допустимые диапазоны длительности цикла, минимальное время зеленого сигнала, интервалы для пешеходов. Отдельно предусмотрены параметры приоритета общественного транспорта: флаг активации, приоритетное направление и дополнительное время зеленой фазы. Такая структура обеспечивает гибкое управление с соблюдением нормативов [5–7].

В ходе исследования была разработана математическая модель адаптивного управления светофорным регулированием на сети перекрестков [8, 9]. Каждый перекресток описывается четырьмя ключевыми параметрами: длительностью полного цикла, продолжительностью зеленых фаз по главному и второстепенному направлениям, а также временным смещением (*offset*) относительно общего времени. Для сети из трех перекрестков решение кодируется 12 параметрами, формируя компактное и удобное для обработки представление.

Модель строго учитывает нормативные требования ГОСТ, включая минимальную продолжительность зеленых фаз (не менее 15 с) и необходимость обеспечения безопасности перехода пешеходов. На основе стандартной скорости пешехода 1,3 м/с рассчитаны минимальные значения времени перехода: 7,7 с для второстепенной дороги (7 м) и 10,4 с для главной (10,5 м). Эти значения жестко заложены в алгоритм как ограничения.

Особое внимание уделено проверке физической реализуемости решений. Алгоритм контролирует, чтобы сумма длительностей зеленых фаз и времени на переключения (8 с на цикл) не превышала длительности цикла. Также проверяется корректность значений *offset*, которые должны находиться в пределах от 0 до длительности цикла. Все эти проверки встроены непосредственно в процедуру генерации и оценки решений, что гарантирует получение только допустимых и безопасных вариантов регулирования [10–12].

Такая структура модели обеспечивает поиск оптимальных решений в строго ограниченном пространстве параметров, где каждый вариант соответствует всем нормативным требованиям и может быть реализован на практике [13–15]. Это позволяет

получать реалистичные и обоснованные схемы управления светофорами, учитывающие как технические ограничения, так и требования безопасности всех участников движения [16, 17].

В ходе исследования для оптимизации параметров светофорного регулирования был успешно применен генетический алгоритм, реализованный с использованием библиотеки DEAP в среде Python. Алгоритм работает с популяцией из 300 особей, где каждая особь представляет собой возможную конфигурацию параметров трех перекрестков, кодируемую в виде 12 числовых значений: длительности полного цикла (cycle), продолжительности зеленых фаз по главному (green_main) и второстепенному (green_secondary) направлениям, а также временного смещения (offset) для синхронизации работы светофоров.

Эволюционный процесс продолжается в течение 5000 поколений, применяя оператор Blend Crossover для эффективного скрещивания особей, гауссовские мутации (mutGaussian) для локального поиска оптимальных решений и турнирную селекцию для отбора наиболее приспособленных особей на основе значений фитнес-функции. Такой подход позволяет алгоритму устойчиво сходиться к эффективным решениям, удовлетворяющим всем нормативным требованиям, при этом обеспечивая оптимальное управление транспортными потоками за счет учета множества взаимосвязанных параметров.

Особенностью данной реализации является тщательно подобранный набор генетических операторов, которые в сочетании с жесткими ограничениями, накладываемыми на пространство поиска, позволяют получать реалистичные и практически применимые решения для сложных систем светофорного регулирования с несколькими перекрестками.

Целевая функция (fitness) определяется как сумма двух ключевых компонентов: суммарной задержки транспортных потоков и штрафа за рассинхронизацию светофоров. Суммарная задержка рассчитывается по формуле

$$Fitness = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M ((C_i - G_{ij}) \times q_{ij} \times w_{ij}) + P, \quad (1)$$

$$P = 1000 \times \sum_{k=2}^N \min(|O_k - E_k|, C_k - |O_k - E_k|), \quad (2)$$

где N – количество перекрестков;

M – количество направлений/потоков на перекрестке;

C_i – длина цикла на перекрестке i ;

G_{ij} – эффективная длина зеленой фазы для потока j на перекрестке i (с учетом бонуса для автобусов);

q_{ij} – интенсивность потока (машин в час);

w_{ij} – вес потока: $1 + 2 \times (\text{доля автобусов})$;

P – штраф за нарушение координации (рассинхронизацию зеленой волны);

$(C_i - G_{ij})$ – сколько времени поток ждет «красный», то есть задержка за цикл;

w_{ij} – увеличивает вклад потока, если там есть автобусы (дает приоритет ОТ);

$G_{ij} = \min(C_i, G_{ij} + \text{bonus})$ где бонус может быть > 0 для автобусов (см. constraints);

O_k – offset (смещение) начала фазы на перекрестке k ;

E_k – ожидаемое прибытие волны (расчет через offset первого перекрестка и travel time).

Дополнительно предусмотрена возможность расширения модели за счет учета заторных состояний. В этом случае вводится дополнительный штраф $P_{\text{затор}}$, если кумулятивная задержка на множестве прилегающих перекрестков превышает заданный порог $D_{\text{кр}}$. Формально это выражается как

$$Fitness = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M ((C_i - G_{ij}) \times q_{ij} \times w_{ij}) + P + P_{\text{затор}}, \quad (3)$$

$I = \{A, B, C\}$ – множество прилегающих перекрестков (например: 1, 2, 3);

D_i – суммарная задержка на перекрестке i в авт*с;

$$D_i = \sum_{j=1}^M (C_i - G_{ij}) \times q_{ij} \times w_{ij}; \quad (4)$$

$D_{\text{общ}} = \sum_{i \in X} D_i$ – кумулятивная задержка на A, B, C ; $D_{\text{кр}}$ – порог (например, 100000 авто*сек);

K_{cong} – коэффициент штрафа за затор; $P_{\text{затор}}$ – дополнительный штраф за затор;

$$P_{\text{затор}} = \begin{cases} K_{\text{cong}} * (D_{\text{общ}} - D_{\text{кр}}), & \text{если } D_{\text{общ}} > D_{\text{кр}} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (5)$$



Рис. 1. Динамика минимального значения фитнеса по поколениям
Источник: составлено авторами

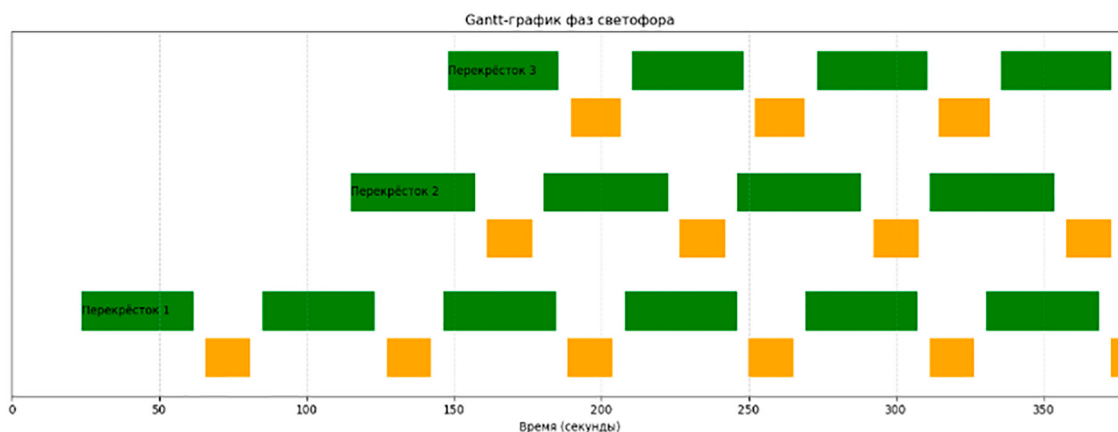


Рис. 2. Gantt-график без зеленой волны
Источник: составлено авторами

Все расчеты и визуализация результатов выполняются с использованием библиотек Pandas, NumPy и Matplotlib, что обеспечивает удобную обработку данных и построение графиков изменения значения фитнес-функции по поколениям (рис. 1). Реализация алгоритма учитывает жесткие ограничения ГОСТ на длительность фаз и переходов, а также позволяет масштабировать решение на произвольное число перекрестков.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные численные эксперименты подтвердили высокую эффективность разработанного генетического алгоритма в оптимизации параметров светофорного регулирования. В базовом сценарии с фиксированным циклом продолжительностью 120 с и жестко заданными фазами (40 с для главного

и 20 с для второстепенного направлений) суммарная задержка составила 778 557 машино-секунд (рис. 2). После 5000 поколений эволюции алгоритм сформировал оптимальное решение, снизив этот показатель на 68,2 % – до 247 184 машино-секунд (рис. 3). Наибольший эффект был достигнут в отношении общественного транспорта: задержки автобусных потоков уменьшились в 3,6 раза (с 44 029 до 12 198 машино-секунд), что стало возможным благодаря внедрению весовой функции, учитывающей приоритетность таких маршрутов. Также удалось сократить среднее время ожидания пешеходов с 100 до 44 с при полном соблюдении требований безопасности. Ключевым преимуществом модели стало жесткое соблюдение нормативов ГОСТ Р 52289-2004, что гарантирует корректность и применимость решений в реальных условиях.

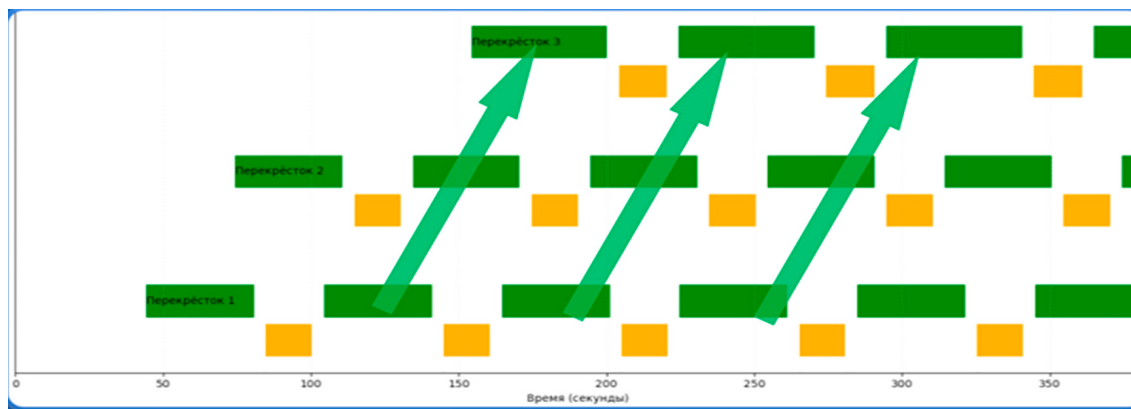


Рис. 3. Gantt-график с зеленой волной
Источник: составлено авторами

Разработанная модель может быть интегрирована в действующие транспортные системы с использованием современных программируемых контроллеров, поддерживающих удаленную настройку фаз и циклов. Поддерживаются устройства серий «КД-СВ», «СТАРТ», «АРГУС», а также международные решения, такие как Siemens Sitraffic sX. Передача параметров в контроллер осуществляется через API, таблицы настройки или промежуточное программное обеспечение, что обеспечивает гибкую адаптацию к текущей дорожной обстановке, централизованное обновление и совместимость с внешними сенсорными и видеосистемами. Модель успешно прошла симуляционные испытания и готова к стендовой или пилотной апробации в условиях реальной городской инфраструктуры.

Заключение

Предложенный подход демонстрирует высокую эффективность в интеллектуальном управлении транспортной инфраструктурой. Разработанная модель светофорного регулирования на базе генетического алгоритма позволяет значительно сократить задержки транспорта и повысить приоритет общественного транспорта при строгом соблюдении нормативов. Такое решение может стать основой для создания адаптивных и масштабируемых интеллектуальных систем управления движением в условиях ограниченной городской инфраструктуры.

Список литературы

1. Borzenkov A., Ostroukh A., Pronin C., Podberezkin A., Kuftinova N. Multi-Criteria Analysis of Genetic Algorithm Applications in Transportation Logistics. 2024. DOI: 10.1109/TIRVED63561.2024.10769798.
2. Ostroukh A., Kuftinova N., Borzenkov A., Podberezkin A., Ostroukh I. Research on Using Deep Learning for Transport Demand Prediction. 2024. DOI: 10.1109/TIRVED63561.2024.10769599.
3. Kuftinova N., Ostroukh A., Maksimych O., Podberezkin A., Volkov A. Large Language Model in Suburban Transport Data Management. 2024. DOI: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496733.
4. Mansurova M. et al. Multi-level intelligent control system for inter-vehicle communication between smart traffic

lights with computer vision and autonomous electric vehicles. In 2024 International Symposium on Sensing and Instrumentation in 5G and IoT Era (ISSI), Lagoa, Portugal. DOI: 10.1109/ISSI63632.2024.10720507 (2024).

5. Genders W., Razavi S. Evaluating reinforcement learning state representations for adaptive traffic signal control // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 130. P. 26–33. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.008.

6. Aslani M., Mesgari S., Wiering M. Adaptive traffic signal control with actor-critic methods in a real-world traffic network with different traffic disruption events // Transportation Research Part C Emerging Technologies. 2017. Vol. 85. P. 732–752. DOI: 10.1016/j.trc.2017.09.020.

7. Zhang Zeyu, Zhu Han, Zhang Wei, Cai Zhiming, Zhu Linkai, Li Zefeng. Multi-Objective Optimization of Traffic Signal Timing at Typical Junctions Based on Genetic Algorithms // Computer Systems Science and Engineering. 2023. Vol. 47. P. 1901–1917. DOI: 10.32604/csse.2023.039395.

8. Liao Xiao-Cheng, Mei Yi, Zhang Mengjie. Learning Traffic Signal Control via Genetic Programming // In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'24). P. 924–932. DOI: 10.1145/3638529.3654037.

9. Hai D.T., Manh D.V., Nhat N.M. Genetic Algorithm Application for Optimizing Traffic Signal Timing Reflecting Vehicle Emission Intensity // Transport Problems. 2022. Vol. 17, Is. 1. P. 15–27. DOI: 10.20858/tp.2022.17.1.01.

10. Li Li, Yisheng Lv. Traffic signal timing via deep reinforcement learning // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2016. Vol. 3. P. 247–254. DOI: 10.1109/JAS.2016.7508798.

11. Tan Min Keng, Chai Shun, Chuo Helen, Lim Kit Guan, Goh Hui Hwang, Teo Kenneth. Adaptive Traffic Signal Control using Genetic Algorithm for a 2x2 Traffic Network. 2024. P. 488–493. DOI: 10.1109/IICAET62352.2024.10730292.

12. Mohamed Mohamed, Essawy Yasmeeen, Hosny Ossama. Traffic Signal Optimization Using Genetic Algorithms. 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-60419-5_8.

13. Sankaranarayanan Manipriya, Yerramsetty Sudhasree, Kakkera Santosh, Kumar Nitant. Adaptive Genetic Algorithm for Reducing Average Waiting Time for Road Traffic Signals. 2024. DOI: 10.1109/ICITIT61487.2024.10580688.

14. Akopov Andranik, Zaripov Evgeny, Melnikov Alexey. Adaptive control of transportation infrastructure in an urban environment using a real-coded genetic algorithm. Business Informatics. 2024. Vol. 18. P. 48–66. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.2.48.66.

15. Stevanovic Aleksandar & Martin Peter, Stevanovic Jelka. VisSim-Based Genetic Algorithm Optimization of Signal Timings. Transportation Research Record. 2035. 2007. P. 59–68. DOI: 10.3141/2035-07.

16. Wang Ping, Yang Qun. Genetic Algorithms Based Traffic Signal Optimization at a Congested Intersection // Applied Mechanics and Materials. 2012. Vol. 209–211. P. 814–817. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.209-211.814.

17. Turkey Ayad, Ahmad Mohd, Yusoff Mohd, Hammad Baraa. Using Genetic Algorithm for Traffic Light Control System with a Pedestrian Crossing. 2009. № 5589. P. 512–519. DOI: 10.1007/978-3-642-02962-2_65.