

УДК 004.8

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В МНОГОАГЕНТНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОЕВЫХ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ¹

Е.А. Зарипов, А.С. Акопов (Москва)

Постоянное увеличение численности индивидуальных транспортных средств в городах приводит к ухудшению пропускной способности уличных дорожных сетей. В свою очередь, это влияет на увеличение значения среднего времени в пути по ансамблю агентов-транспортных средств (уменьшению общего количества автомобилей, проезжающих за фиксированный интервал времени), приводит к росту расходов топлива, и, как следствие, концентрации вредных выбросов в атмосфере и т.д. С другой стороны, существуют определенные способы улучшения пропускной способности локальных участков уличной дорожной сети, такие как, оптимизация длительности регулирующих фаз светофоров и изменение конфигурации (геометрии) дорог, расширение проезжей части, организация новых полос движения и др. Данное исследование направлено на оптимизацию транспортных потоков в многоагентных интеллектуальных транспортных системах (ИТС) с использованием роевых и генетических алгоритмов, предложенных авторами с целью обеспечения адаптивного управления длительностями регулирующих сигналов светофоров. Для этого с использованием AnyLogic был создан прототип локального участка уличной дорожной сети с регулирующими пешеходными переходами, который в дальнейшем был масштабирован в виде цифрового двойника локального участка уличной дорожной сети (на примере, транспортной развязки в районе метро Юго-Западная г. Москвы).

Методология исследования основана на использовании феноменологического подхода Акопова-Бекларяна [1-2], методов агентного имитационного моделирования интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [3-6], генетических и роевых оптимизационных алгоритмов [7-8], а также алгоритма гибридной плотностной кластеризации HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) [9]. Данный алгоритм применяется для оценки структуры транспортных потоков и определения моментов времени переключения между относительно быстрым, но менее точным методом роя частиц и ресурсозатратным, но более устойчивым к локальным экстремумам генетическим алгоритмом.

Агентами в исследуемой ИТС являются транспортные средства и пешеходы, которые взаимодействуют друг с другом и внешней средой. Также стационарными агентами являются светофоры с управляемыми характеристиками – длительностями фаз регулирующих сигналов.

Приведем краткое формальное описание разработанной модели.

Пусть:

- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{|T|}\}$ – набор моментов модельного времени, $|T|$ – все моменты модельного времени, t_k – заданный момент модельного времени ($t_k \in T, k = 1, 2, \dots, |T|$);
- $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{|I|}\}$ – набор индексов моментов агентов-транспортных средств (ТС), $|I|$ – общее количество транспортных средств;

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-11-00080).

- $\{x_i(t_k), y_i(t_k)\}$, $i \in I$ – координаты i -го агента в момент t_k , ($t_k \in T$);
- $\alpha_i(t_k)$, $i \in I$ – угол направления движения i -го агента в момент t_k , ($t_k \in T$);
- $v_i(t_k)$ – скорость движения i -го агента в момент t_k , ($t_k \in T$);
- $s_i(t_k) \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ – состояния i -го агента в момент t_k , ($t_k \in T$): $s_i(t_k) = 0$ – агент-ТС находится в стационарном состоянии, например, на светофоре, в пробке и т.д., $s_i(t_k) = 1$ – агент-ТС перемещается по линейному участку дороги в направлении «С-Ю» («север-юг»), $s_i(t_k) = 2$ – агент-ТС перемещается по линейному участку дороги в направлении «Ю-С» («юг-север»); $s_i(t_k) = 3$ – агент-ТС перемещается по линейному участку дороги в направлении «З-В» («запад-восток»); $s_i(t_k) = 4$ – агент-ТС перемещается по линейному участку дороги в направлении «В-З» («восток-запад»); $s_i(t_k) = 5$ – агент-ТС перемещается в иных направлениях (хордовое движение), например, «северо-восток», «юго-запад» и т.д.;
- $\delta_i(t_{k-1}) = \begin{cases} -1, & \text{если } s_i(t_{k-1}) \in \{1, 4\}, \\ 1, & \text{если } s_i(t_{k-1}) \in \{2, 3\}. \end{cases}$ – знак, задающий направление перемещения

агента-ТС по линейному участку дороги.

Для моделирования пространственной динамики агентов-транспортных средств используется следующая система конечно-разностных уравнений с переменной структурой в каждый момент времени t_k , ($t_k \in T$, $k = 1, 2, \dots, |T|$):

$$x_i(t_k) = \begin{cases} x_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется I,} \\ x_i(t_{k-1}) + \delta_i(t_{k-1})v_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется II,} \\ x_i(t_{k-1}) + v_i(t_{k-1})\cos\alpha(t_{k-1}), & \text{если выполняется III,} \end{cases} \quad (1)$$

$$y(t_k) = \begin{cases} y(t_{k-1}), & \text{если выполняется II,} \\ y(t_{k-1}) + \delta_i(t_{k-1})v(t_{k-1}), & \text{если выполняется I} \\ y(t_{k-1}) + v(t_{k-1})\sin\alpha(t_{k-1}), & \text{если выполняется III,} \end{cases} \quad (2)$$

где

- I. $s_i(t_{k-1}) \in \{1, 2\}$ или $s_i(t_{k-1}) = 0$, что означает, что i -й агент-ТС ($i \in I$) перемещается по линейному участку дороги в направлении «С-Ю» или «Ю-С», либо находится в стационарном состоянии;
- II. $s_i(t_{k-1}) \in \{3, 4\}$ или $s_i(t_{k-1}) = 0$, что означает, что i -й агент-ТС ($i \in I$) перемещается по линейному участку дороги в направлении «З-В» или «В-З», либо находится в стационарном состоянии;
- III. $s_i(t_{k-1}) = 5$, что означает, что i -й агент-ТС ($i \in I$) перемещается «хордовом» направлении с дирекционным углом $\alpha_i(t_{k-1})$, $i \in I$.

Система уравнений (1)-(2) реализована в AnyLogic с помощью библиотеки дорожного движения в более сложной конфигурации, учитывающей движение агентов-ТС по криволинейным траекториям, маневрирование агентов-ТС, в том числе, обгон, торможение, смена полосы движения, а также недопущение столкновений агентов-ТС друг с другом в процессе движения. Подобная функциональность достигается за счет разбиения моделируемого участка уличной дорожной сети на фрагменты (участки), при нахождении в которых используется то или иное уравнение движения агента-ТС

(в зависимости от участка дороги, способа маневрирования и т.д.), как схематично показано на рис. 1.

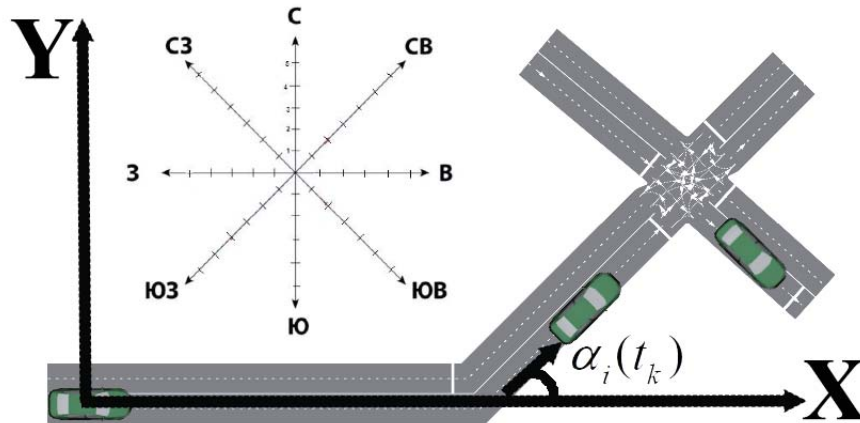


Рис. 1. Иллюстрация движения агента-ТС по участку уличной дорожной сети

Интеграция светофоров в имитационную модель многоагентной ИТС, реализованную в AnyLogic, как агентов с управляемыми характеристиками (вычисляемыми с использованием чередующегося генетического и роевого оптимизационного алгоритма) проиллюстрирована на рис. 2 в виде цифровой модели «четырёх» связанных перекрестков [3].

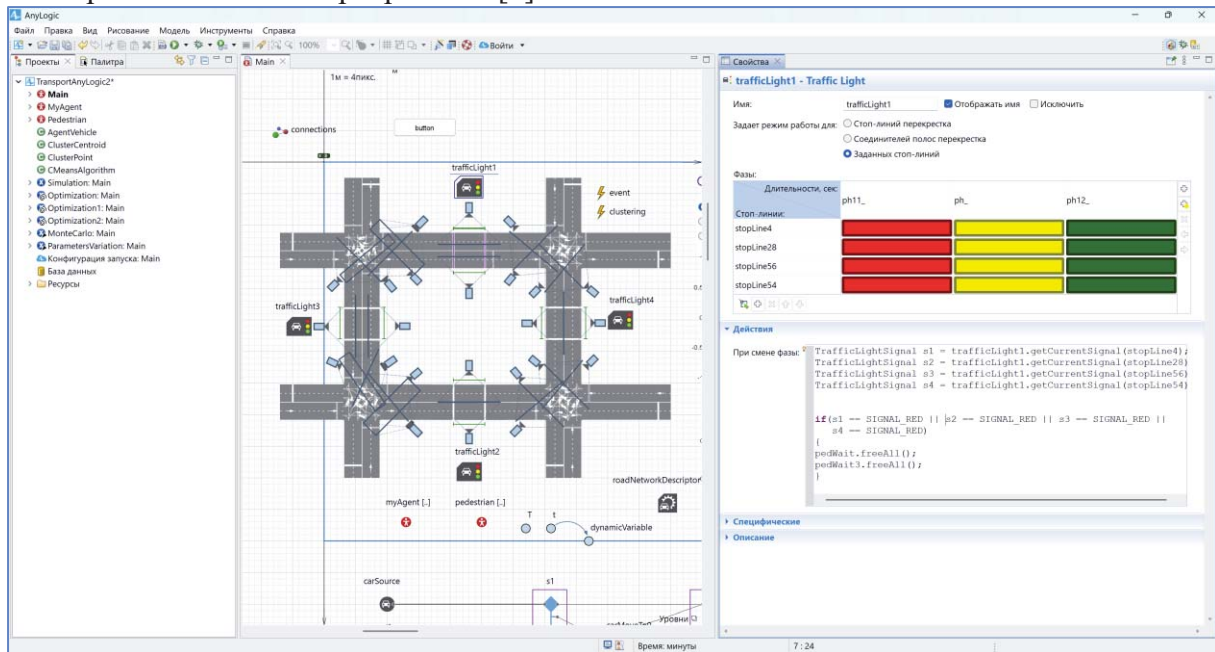


Рис. 2. Иллюстрация интеграции светофоров как агентов с управляемыми характеристиками в имитационную модель многоагентной ИТС

Количество транспортных средств, проезжающих через выбранный локальный участок уличной дорожной сети, является функцией от пространственных координат каждого агента, проезжающего через зону выезда (из транспортной развязки), и может быть вычислено по следующей формуле:

$$N = \sum_{t=1}^{|T|} \sum_{i=1}^{|I|} m_i(t_k), \quad (3)$$

где

$$m_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \{x_i(t_{k-1}), y_i(t_{k-1})\} \notin G, \\ 0, & \text{если } \{x_i(t_{k-1}), y_i(t_{k-1})\} \in G, \end{cases} \quad (4)$$

здесь G – множество всех координат локального участка уличной дорожной сети, через который проезжают агенты-ТС.

Управляющими параметрами в подобной многоагентной ИТС являются длительности регулирующих сигналов светофоров (красного, желтого и зеленого), которые можно обозначить переменными $\{\tau_{1l}(t_k), \tau_{2l}(t_k), \tau_{3l}(t_k)\}_{l=1}^{|L|}$, $l \in L$, где $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{|L|}\}$ – набор индексов светофоров с управляемыми длительностями фаз регулирующих сигналов; L – все светофоры в многоагентной ИТС.

Далее можно сформулировать оптимизационную задачу, решаемую в многоагентной ИТС в следующем виде.

Задача А. Требуется максимизировать количество агентов-ТС, проезжающих через локальный участок уличной дорожной сети по набору управляющих параметров $\{\tau_{1l}(t_k), \tau_{2l}(t_k), \tau_{3l}(t_k)\}_{l=1}^{|L|}$ к моменту времени $|T|$:
$$\max_{\{\tau_{1l}(t_k), \tau_{2l}(t_k), \tau_{3l}(t_k)\}_{l=1}^{|L|}} N$$

при ограничениях $\underline{\tau}_1 \leq \tau_{1l}(t_k) \leq \bar{\tau}_1$, $\underline{\tau}_2 \leq \tau_{2l}(t_k) \leq \bar{\tau}_2$, $\underline{\tau}_3 \leq \tau_{3l}(t_k) \leq \bar{\tau}_3$.

Здесь $\{\underline{\tau}_1, \underline{\tau}_2, \underline{\tau}_3\}$, $\{\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2, \bar{\tau}_3\}$ – заданные нижние и верхние граничные значения управляющих параметров моделей (ограничения на длительности регулирующих сигналов светофоров).

Задача А была решена с использованием генетических и роевых оптимизационных алгоритмов, разработанных авторами и описанных в работах [2-6].

Теоретические основы генетических алгоритмов были предложены Дж. Холландом [7]. Такие алгоритмы основаны на использовании принципов естественного отбора в процессе эволюционного поиска: селекции наиболее приспособленных особей (потенциальных решений), их скрещивания (кроссинговера) и мутации (случайного изменения одной или нескольких хромосом). Подобные алгоритмы, как правило, характеризуются высокой точностью поиска решений, устойчивостью к застреванию в локальных экстремумах (за счет мутации) и сходимостью к глобальному экстремуму. Однако они являются ресурсозатратными, особенно если целевая функция вычисляется в результате имитационного моделирования.

С другой стороны, существуют и активно используются роевые оптимизационные алгоритмы [8]. Особенностью таких алгоритмов является более быстрый механизм эволюционного поиска, так как, вместо популяции используется рой частиц, в котором каждая частица содержит вектор искомых переменных (и соответствующее ему решение), со значениями, пересчитываемыми на каждой итерации в зависимости от результатов поиска данной частицы и роя в целом. Отсутствие операций селекции, кроссинговера, мутации, обновления популяции, кодирования и декодирования значений искомых переменных и др. позволяет роевым алгоритмам осуществлять поиск решений с гораздо большей временной эффективностью. Однако такие алгоритмы склонны застревать в локальных экстремумах и являются менее точными.

Особенностью гибридных эволюционных алгоритмов, предложенных авторами [2, 6], является механизм чередования, которое зависит от интенсивности и плотности транспортного потока оцениваемого с помощью алгоритма гибридной кластеризации HDBSCAN [8]. Алгоритм HDBSCAN предназначен для обнаружения кластеров в

наборах данных на основе распределения плотности точек данных (в качестве таких точек могут выступать координаты агентов-ТС). В разработанных авторами гибридных эволюционных алгоритмах используются специфичные генетические операторы кроссовера и мутации (операторы вещественного кодирования) и адаптивное управление параметрами, задающими скорость и направления изменения искомым переменных в рое частиц. Также периодически роевой и генетический алгоритмы обмениваются наилучшими решениями с целью преодоления проблемы застревания в локальных экстремумах и обеспечения более высокой точности получаемых решений и временной эффективности алгоритма. В результате, вычисляются оптимальные значения длительностей регулирующих сигналов светофоров.

После апробации предложенного подхода на цифровой модели «четырех» связанных перекрестков, была разработана имитационная модель локального участка уличной дорожной сети района станции метро Юго-Западная г. Москвы с реализацией в AnyLogic [4], характеризующая высокой конфигурационной сложностью и интенсивностью транспортных потоков, а также наличием множественных регулируемых перекрестков (рис. 3).

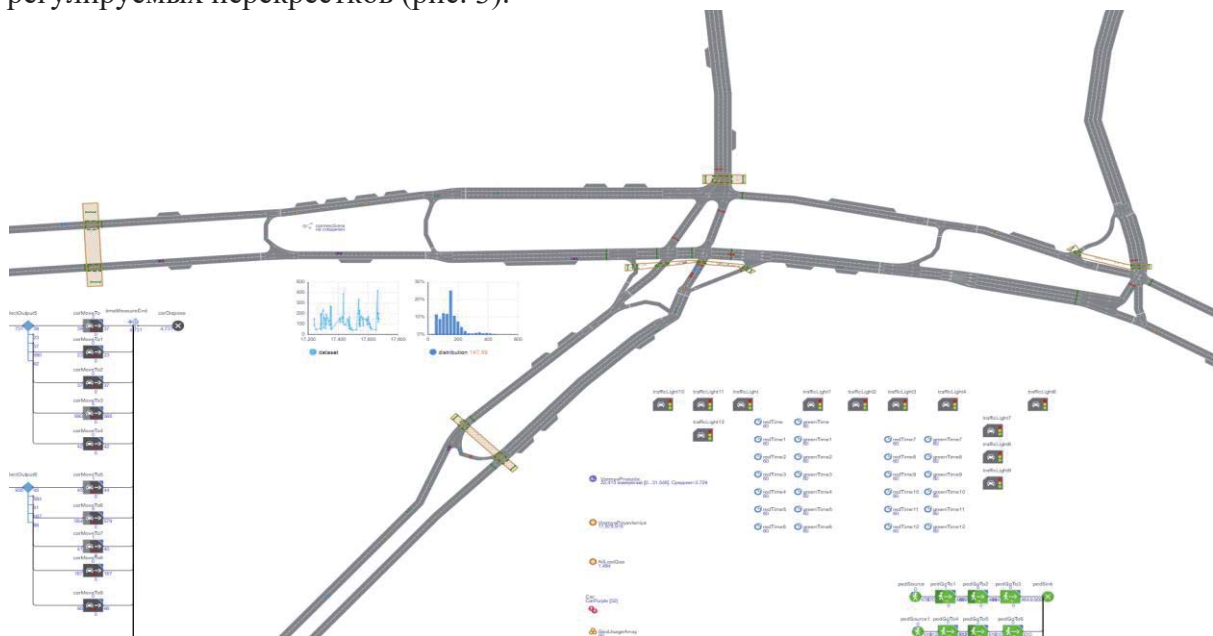


Рис. 3. Фрагмент имитационной модели локального участка уличной дорожной сети в районе метро Юго-Западная г. Москвы

Подробное описание разработанной имитационной модели многоагентной ИТС, использующей генетические и роевые алгоритмы для оптимизации транспортных потоков, приведено в работах [4-6]. Будущие исследования будут направлены на разработку моделей многоагентных ИТС с более сложными (многоуровневыми, многосвязными) конфигурациями и использующими алгоритмы адаптивного управления светофорами на основе нейронных сетей и нечёткой логики.

Литература

1. Akopov A.S., Beklaryan L.A. and Thakur M. Improvement of Maneuverability Within a Multiagent Fuzzy Transportation System With the Use of Parallel Biobjective Real-Coded Genetic Algorithm // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2022. vol. 23, no. 8, pp. 12648-12664. DOI: 10.1109/TITS.2021.3115827.

2. **Akopov A.S., Beklaryan L.A.** Traffic Improvement in Manhattan Road Networks With the Use of Parallel Hybrid Biobjective Genetic Algorithm // IEEE Access. 2024. vol. 12, pp. 19532-19552. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3361399.
3. **Бекларян А.Л., Бекларян Л.А., Акопов А.С.** Имитационная модель интеллектуальной транспортной системы «умного города» с адаптивным управлением светофорами на основе нечеткой кластеризации // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 3. С. 70–86. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.3.70.86.
4. **Зарипов Е.А., Мельников А.М., Акопов А.С.** Имитационное моделирование и оптимизация транспортных потоков в локальных участках уличной дорожной сети с использованием системы AnyLogic // Информационные технологии. Т. 30. №4. 2024. С. 183-189. DOI: 10.17587/it.30.183-189.
5. **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.
6. **Зарипов Е.А., Акопов А.С.** Моделирование и оптимизация характеристик интеллектуальной транспортной системы «умного города» с использованием гибридных эволюционных алгоритмов // Бизнес-информатики. 2025. Т. 19. No 1. С. 34-49. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.34.49.
7. **Holland J.H.** Adaptation in Natural and Artificial Systems. 1975, MIT Press.
8. **Kennedy J., Eberhart R.** Particle Swarm Optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. 1995. Vol. IV. P. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
9. **Viswanath P., Pinkesh R.** l-DBSCAN: A Fast Hybrid Density Based Clustering Method // 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06), Hong Kong, China, 2006, pp. 912-915. DOI: 10.1109/ICPR.2006.741.