На правах рукописи



Зарипов Евгений Андреевич

МНОГОАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

Научная специальность 2.3.8.

Информатика и информационные процессы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва – 2026 г.

Работа выполнена на кафедре «Инструментального и прикладного программного обеспечения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, профессор РАН
Акопов Андраник Сумбатович

Официальные оппоненты: **Шмалько Елизавета Юрьевна,** доктор технических наук, федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», ведущий научный сотрудник отдела № 55 «Управление робототехническими устройствами» отделения № 5;

Кутейников Иван Алексеевич, кандидат физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», доцент кафедры «Инженерия и математика прикладных систем искусственного интеллекта».

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Защита состоится «22» января 2027 г. в _____ часов, на заседании диссертационного совета 55.2.002.02 на базе ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке МТУСИ и на сайте диссертационного совета: https://dis.mtuci.ru/dis/02/.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.002.02
кандидат технических наук, доцент М. Г. Городничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На современном этапе развития информационного общества значительно возрастает потребность в эффективных методах и алгоритмах управления сложными динамическими системами, в том числе транспортной инфраструктурой мегаполисов. Интенсивный рост городского трафика, высокая стохастичность и непредсказуемость транспортных потоков, а также экономические и технические ограничения на расширение инфраструктуры требуют внедрения интеллектуальных информационных технологий и автоматизированных систем поддержки принятия решений.

Современные методы светофорного регулирования, основанные на фиксированных фазах и временных циклах, не способны гибко адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям движения. При этом применение систем реального времени требует значительных вложений в инфраструктуру сбора и передачи данных, что не всегда реализуемо в рамках экономических и технических ограничений конкретных городов.

Одним из перспективных направлений решения данных проблем является использование имитационного моделирования в сочетании с эволюционными алгоритмами оптимизации. В частности, разработка многоагентных систем управления транспортными потоками, позволяющих проводить предварительную оптимизацию параметров регулирования, является перспективным решением задачи управления трафиком без существенных дополнительных затрат на развитие инфраструктуры. Особое внимание в работе уделяется учёту индивидуального поведения транспортных агентов, включая маневрирование и смену полосы движения, что позволяет повысить достоверность имитационной модели и корректность результатов оптимизации параметров светофорного регулирования.

В рамках исследования рассматриваются шесть адаптивных моделей управления, каждая из которых основана на собственной комбинации механизмов поиска, эволюционной адаптации и стохастического обновления.

Степень разработанности темы.

В области управления транспортными потоками накоплен значительный научный задел. В частности, Гасников А.В. и соавторы исследовали математические модели распределения транспортных потоков, а Бекларян А.Л., Бекларян Л.А. и Акопов А.С. разработали имитационную модель транспортной системы с адаптивным управлением светофорами. Среди работ по эволюционным методам оптимизации следует отметить исследования Дивеева А.И. и Шмалько Е.Ю. Вместе с тем недостаточно исследованы вопросы предварительной оптимизации светофорного регулирования на основе гибридных эволюционных алгоритмов и их интеграции с многоагентными имитационными моделями. Это определяет актуальность разработки МАСППР, представленной в диссертационной работе.

Объектом исследования является многоагентная система поддержки принятия решений по управлению транспортными потоками, реализованная на основе имитационной модели и интегрированных алгоритмов оптимизации.

Предметом исследования являются информационные процессы и алгоритмические механизмы адаптивного управления транспортными потоками в многоагентных системах поддержки принятия решений, включая механизмы параметрического задания частоты маневрирования транспортных агентов (смены полос движения) в рамках имитационного моделирования и оптимизации режимов светофорного регулирования.

Целью исследования является повышение эффективности управления транспортными потоками путём разработки и сравнения адаптивных моделей управления, основанных на интеграции агентной транспортной модели и шести различных гибридных алгоритмов эволюционной оптимизации.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Проведён анализ современных подходов к управлению транспортными потоками, выявлены ограничения традиционных методов регулирования с точки зрения адаптивности, масштабируемости и обработки информации в интеллектуальных транспортных системах.
2. Разработана математическая модель адаптивного светофорного регулирования, учитывающая особенности информационного обмена между агентами транспортной системы и обеспечивающая возможность интеграции алгоритмов оптимизации.
3. Предложены и реализованы оригинальные модификации гибридных эволюционных алгоритмов - USS-PSO, ARGEN, EIO и HGSO, отличающиеся адаптивными механизмами настройки параметров и динамическим балансом между глобальным и локальным поиском. Выбор именно этих алгоритмов обусловлен результатами предыдущих исследований автора, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, и их эффективностью в задачах оптимизации стохастических систем с ограниченными вычислительными ресурсами
4. Разработана имитационная многоагентная модель интеллектуальной транспортной системы в среде AnyLogic, обеспечивающая воспроизводимость экспериментов и возможность параметрической оптимизации светофорных планов.
5. Реализован параметризуемый механизм учёта индивидуального маневрирования транспортных агентов (смены полос движения) в многоагентной имитационной модели и выполнена оценка робастности оптимальных параметров светофорного регулирования при варьировании частоты маневрирования агентов.
6. Проведены вычислительные эксперименты и выполнен сравнительный анализ эффективности шести адаптивных моделей управления транспортными потоками, различающихся применяемыми алгоритмами оптимизации, по совокупности метрик эффективности.

Методы исследования. В работе использовались методы математического и имитационного моделирования, теория вероятностей и математическая статистика, методы эволюционной оптимизации, а также технологии агентного моделирования и алгоритмического программирования в среде AnyLogic.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм управляемого стохастического сдвига, реализованный как модификация алгоритма роя частиц (PSO) (USS-PSO), *отличающийся* введением механизма направленного стохастического смещения и динамической адаптацией его параметров на основе темпов изменения глобального оптимума, предложенный алгоритм обеспечивает повышение устойчивости поиска, снижение вероятности застревания в локальных экстремумах и ускорение сходимости при решении задач оптимизации параметров светофорного регулирования в стохастической транспортной среде.
2. Разработана многоагентная система поддержки принятия решений по управлению транспортными потоками, в которой имитационная модель, реализованная в среде AnyLogic, используется как среда имитационного эксперимента и вычисления управляющих параметров, в отличие от подходов, в которых имитационная модель используется только для оценки, предложенная система реализует единый вычислительный контур «имитационное моделирование – оценка состояния – оптимизация – обновление параметров», обеспечивающий воспроизводимость результатов и согласованную работу моделирования и оптимизационного ядра.
3. Предложена методика предварительной оптимизации параметров светофорного регулирования в интеллектуальных транспортных системах, основанная на интеграции многоагентного имитационного моделирования и эволюционных алгоритмов, методика отличается использованием многоуровневой оценки эффективности, включающей совокупность транспортных показателей (среднее время проезда, длину очередей, число остановок и топливные потери), и позволяет формировать эффективные параметры управления до их применения в реальной системе без необходимости постоянного онлайн-мониторинга транспортного потока.
4. Разработан способ учета индивидуального маневрирования транспортных агентов при оптимизации параметров светофорного регулирования в многоагентной среде, выполнена экспериментальная оценка робастности полученных решений при вариации частоты маневрирования агентов, что позволило установить устойчивость оптимальных параметров управления в условиях поведенческой неоднородности транспортного потока.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в развитии и совершенствовании методов эволюционной оптимизации и их интеграции с имитационными платформами для решения задач управления транспортными потоками. Практическая значимость состоит в возможности применения разработанных алгоритмов и методик в реальных

системах управления транспортными потоками городов, снижая экономические и временные затраты на внедрение и эксплуатацию интеллектуальных систем.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности:

Диссертационная работа соответствует специальности 2.3.8 - «Информатика и информационные процессы», поскольку основной вклад связан с разработкой моделей, алгоритмов и системы поддержки принятия решений для анализа и оптимизации информационных процессов в сложной динамической среде. Работа соответствует **п. 1** паспорта специальности в части разработки компьютерных моделей описания, оценки и оптимизации информационных процессов; **п. 6 -** в части применения информационных технологий и систем в принятии решений; **п. 8 -** в части разработки систем принятия решений на основе имитационных моделей прогнозирования процессов и событий.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Методика предварительной оптимизации параметров светофорного регулирования в интеллектуальных транспортных системах, основанная на интеграции многоагентного имитационного моделирования и эволюционных алгоритмов и обеспечивающая формирование эффективных параметров управления в условиях отсутствия полной информации о текущем состоянии транспортного потока без использования постоянного онлайн-мониторинга.
2. Алгоритм управляемого стохастического сдвига, реализованный как модификация алгоритма роя частиц (PSO), включающий механизм динамической адаптации параметров на основе изменения глобального оптимума и обеспечивающий повышение скорости сходимости и устойчивости поиска решений при оптимизации параметров светофорного регулирования.
3. Многоагентная система поддержки принятия решений по управлению транспортными потоками, реализующая единый вычислительный контур «моделирование – оценка – оптимизация – обновление параметров» и обеспечивающая формирование управляющих решений на основе результатов имитационного эксперимента в рамках единой программной среды.
4. Устойчивость оптимальных параметров светофорного регулирования к вариации поведения транспортных агентов, в том числе частоты маневрирования, подтвержденная серией повторяемых имитационных экспериментов, что свидетельствует о применимости предложенных решений в условиях стохастичности и поведенческой неоднородности транспортного потока.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались в рамках следующих мероприятий:

1. Двенадцатая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности

«Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2025)» (Санкт-Петербург, 2025 г.);

2. Финал X Всероссийского молодёжного научного форума «Наука будущего – наука молодых» (Саратов, 2025 г.);

3. Всероссийская научная конференция молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2024)» (Москва, 2024 г.);

4. Всероссийская научная конференция молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2023)» (Москва, 2023 г.);

5. Национальная научно-практическая конференция «Цифровые технологии и управление качеством в технических системах» (Москва, 2022 г.).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты опубликованы в 15 научных работах, из них 4 статьи - в изданиях, уровня ВАК, включая 2 статьи в журналах, индексируемых в Web of Science / Scopus. Также опубликовано 11 работ в сборниках трудов конференций и изданиях, индексируемых в РИНЦ. Публикации отражают основные результаты исследования, включая разработанные модели, алгоритмы и результаты вычислительных экспериментов. **Участие в грантах и проектах.** Результаты диссертационного исследования получены и внедрены в рамках выполнения научного проекта Российского научного фонда (РНФ) №23-11-00080 (2023–2025) «Эволюционное моделирование интеллектуальных транспортных систем “умного” города: принятие индивидуальных решений, кластеризация агентов и оптимизация характеристик среды», в котором автор принимал участие в качестве исполнителя. Разработанные математические модели и алгоритмы интегрированы в исследовательскую платформу проекта и используются в рамках экспериментальных исследований по направлению интеллектуального управления транспортными потоками.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием строгого математического аппарата, формализованных моделей и корректно описанных алгоритмов, основанных на современных методах эволюционной оптимизации и многоагентного моделирования. Верификация проводилась на модели улично-дорожного участка городской сети, включающего 13 регулируемых перекрёстков проспекта Вернадского в районе станции метро «Юго-Западная». Такая модель отражает типовую конфигурацию городской транспортной инфраструктуры и обеспечивает возможность воспроизводимой оценки эффективности различных стратегий регулирования. Репрезентативность результатов обеспечивается за счёт проведения многосценарных имитационных экспериментов при разных интенсивностях потоков, распределениях транспортных средств и длительностях фаз светофоров. Дополнительно подтверждена устойчивость и воспроизводимость полученных данных при повторных запусках модели и изменении исходных параметров, что свидетельствует о надёжности и статистической достоверности результатов.

Личный вклад автора

Все положения, выносимые на защиту, а также описанные алгоритмы, модели и методики являются результатом личной работы автора. Автором сформулирована научная гипотеза, разработаны математические модели и алгоритмы, реализована программная часть в среде AnyLogic и Java, проведены вычислительные эксперименты, выполнена обработка данных и анализ полученных результатов. Все публикации по теме диссертации подготовлены при ведущем участии автора.

Краткое описание содержания диссертации

В **первой главе** установлено, что фиксированные светофорные циклы не позволяют учесть изменения интенсивности движения, а сетевые методы на основе обучения с подкреплением требуют данных о текущем состоянии потока. Для предварительной настройки светофорных планов выбрано имитационное моделирование с эволюционной оптимизацией.

Во **второй главе** разработана многоагентная имитационная модель улично-дорожного участка городской сети в среде AnyLogic. Выбор данной платформы обусловлен возможностью совмещения агентного моделирования, дискретно-событийной логики, Java-кода и оптимизационного контура в рамках одной программной среды.

В качестве объекта моделирования выбран участок улично-дорожной сети в районе станции метро «Юго-Западная», включающий 13 взаимосвязанных регулируемых перекрёстков, светофорных объектов и пешеходных переходов, рисунки 1а–1б. Такой масштаб позволяет исследовать не одиночный перекрёсток, а связанный фрагмент городской улично-дорожной сети с очередями, взаимным влиянием потоков и изменяющейся транспортной нагрузкой.

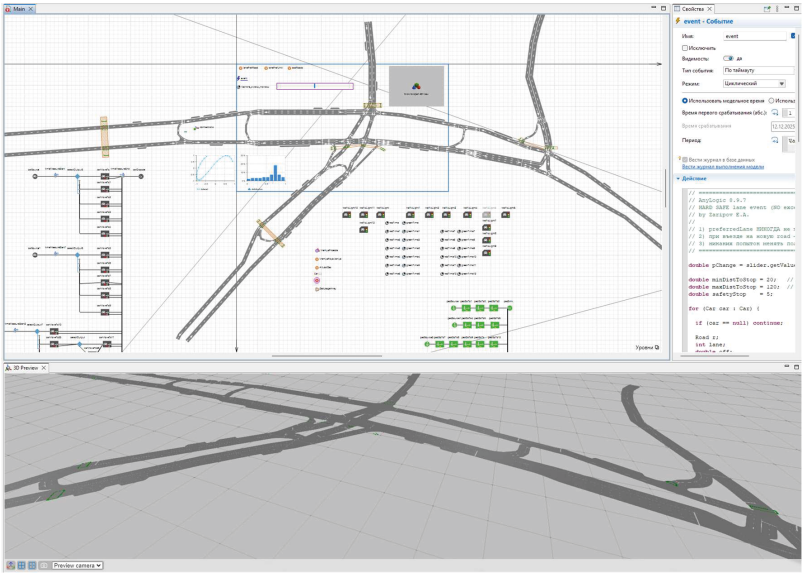


Рисунок 1а – Реализация цифровой имитационной модели участка уличной дорожной сети (Часть 1)

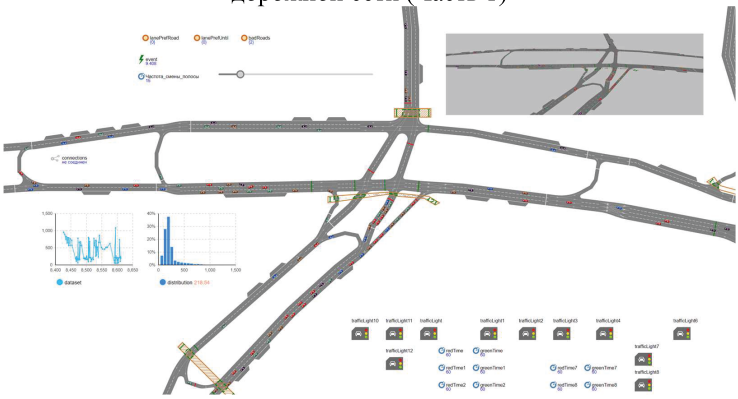


Рисунок 1б – Реализация цифровой имитационной модели участка уличной дорожной сети (Часть 2)

Многоагентный подход реализован через представление транспортных средств, пешеходов и светофорных объектов как взаимодействующих агентов. Каждое транспортное средство имеет собственные параметры движения, маршрут и текущее состояние, что позволяет учитывать стохастичность потока, образование очередей и локальные конфликты на регулируемых участках.

Дополнительно в модели реализован механизм индивидуального маневрирования транспортных агентов, связанный со сменой полос движения. **Интенсивность маневрирования задаётся параметром β, который определяет частоту перестроений в допустимых участках дорожной сети.**

Этот механизм используется не только для повышения реалистичности модели, но и для оценки устойчивости найденных параметров светофорного регулирования при изменении поведения агентов, рисунки 2а–2в.

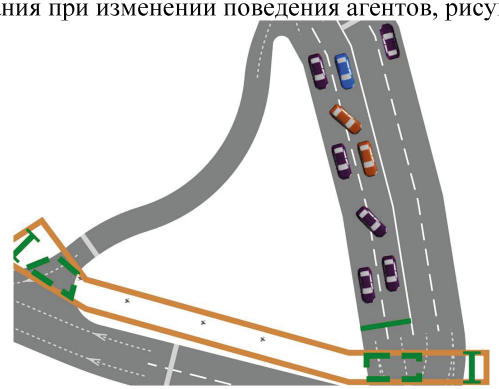


Рисунок 2а – Визуализация маневрирования транспортных средств в ходе моделирования (2D-представление): смена полосы в допустимой зоне до стоп-линии

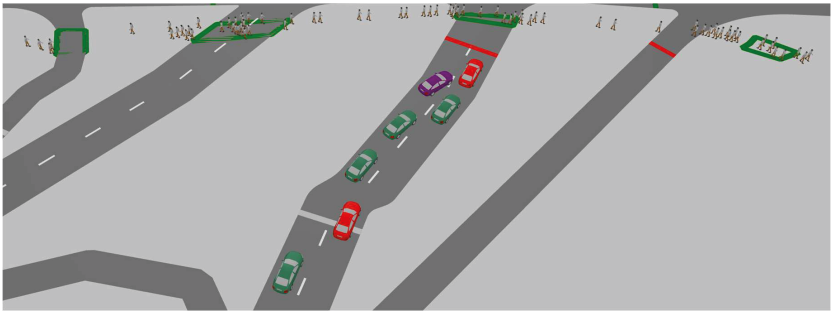


Рисунок 2б – Визуализация маневрирования транспортных средств в ходе моделирования (3D-представление): смена полосы и траектории движения на подходе к перекрёстку

Интенсивности транспортных потоков задаются на основе открытых агрегированных оценок и типовых сценариев суточной неравномерности движения. Параметры пиков и спадов трафика воспроизводятся с использованием 15-минутных интервалов интенсивности, что позволяет имитировать характерную динамику городского движения.

В модели реализованы агенты-светофоры и пешеходы. Параметры фаз обновляются алгоритмами между вычислительными итерациями в рамках симуляции без ручного вмешательства. **При этом речь идет о режиме имитационного эксперимента, а не о промышленном онлайн-управлении АСУДД.** Такой подход позволяет анализировать реакцию системы на изменение интенсивности движения и случайные флуктуации транспортного потока.

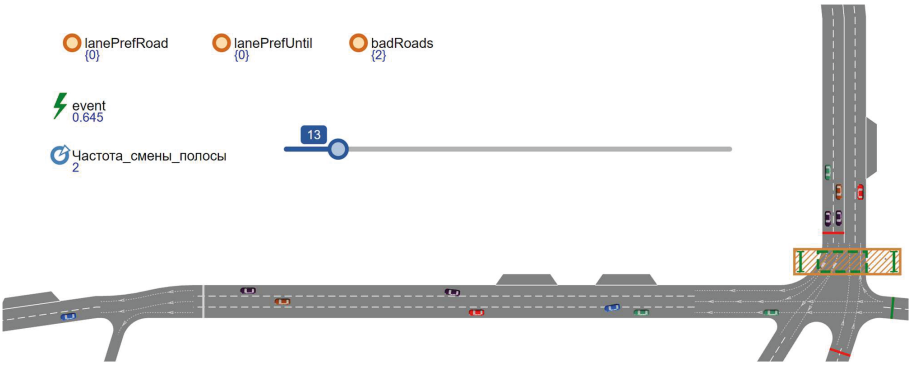


Рисунок 2в – Пользовательский интерфейс модели: ползунок задания частоты маневрирования β и режим визуализации 2D (управление интенсивностью смены полос)

Ключевыми компонентами модели являются дорожные сегменты, перекрёстки, источники и стоки транспорта, светофорные объекты и датчики потока, рис. 3. Модель позволяет анализировать эффективность различных сценариев светофорного регулирования и сохраняет возможность масштабирования без переработки архитектуры.

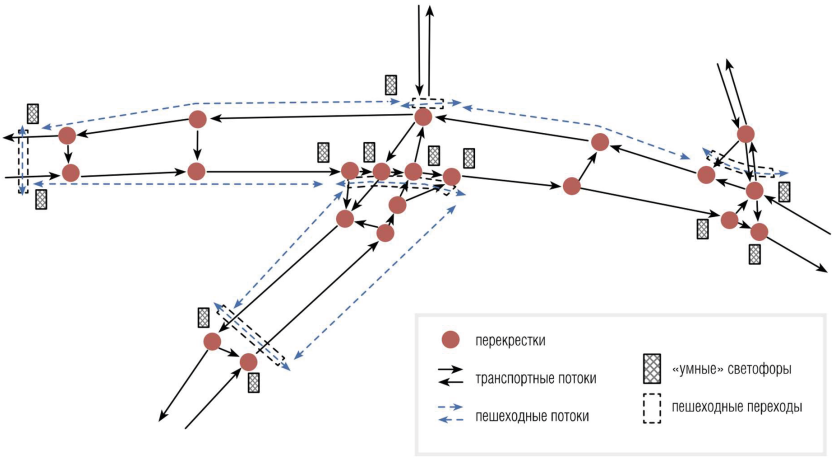


Рисунок 3 – Обобщенная схема имитационной модели

Оптимизация параметров светофорного регулирования в диссертационном исследовании представлена в виде задачи минимизации целевой функции, учитывающей совокупность показателей эффективности транспортного потока.

Однокритериальная постановка задачи (среднее время задержек) используется для предварительной калибровки модели, а многокритериальная (с учётом времени, топлива и выбросов) – для полноценной оптимизации. Это отражает логическую эволюцию постановки задачи от простого к сложному.

Пусть $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор управляемых параметров, задающих длительности фаз светофорных сигналов.

Целевая функция многоагентной системы управления транспортными потоками формулируется следующим образом:

$$F(X) = \alpha_1 \frac{T_{avg}(X)}{T_{max}} + \alpha_2 \frac{L_{fuel}(X)}{L_{max}} + \alpha_3 \frac{E_{emissions}(X)}{E_{max}} \quad (1)$$

где:

- $T_{avg}(\mathbf{X})$ – среднее время проезда через перекрёсток при установленных значениях длительности фаз светофорных сигналов **X**, сек.;
- L_{fuel} $(\mathbf{X})$ – общий объем потерь топлива, л;
- $E_{emissions}(\mathbf{X})$ – суммарные выбросы CO_2, г;
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты весов, определяющие приоритетность каждого критерия.

Каждый критерий нормируется по максимальному допустимому или эмпирически зафиксированному значению, что делает функцию **безразмерной** и обеспечивает корректное сопоставление разноразмерных показателей. Коэффициенты α_i задают приоритет критериев целевой функции и **отличаются по смыслу** от адаптивного коэффициента $\lambda(t)$ в алгоритме USS-PSO. Выработка рекомендаций (СППР) по параметрам фаз выполняется с соблюдением нормативных ограничений на длительность сигналов и безопасность пешеходов, что гарантирует корректное поведение модели.

Таким образом, оптимизационная задача формулируется следующим образом **Задача.** *Требуется определить оптимальные значения длительности регулирующих сигналов светофоров* $x_r \in \mathbf{X}$, $(r = 1, 2, \dots, n)$ *в многоагентной интеллектуальной транспортной системе, при которых обеспечивается минимизация целевого функционала:*

$$\min_{\mathbf{X}} F(\mathbf{X}) \quad (2)$$

При этом F(X) задаётся в соответствии с формулой и включает нормированные показатели: среднее время проезда $T_{avg}(\boldsymbol{X})$, потери топлива $L_{fuel}(\boldsymbol{X})$ и выбросы $E_{emissions}(\boldsymbol{X})$, агрегированные с использованием весовых коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

при ограничениях:

$$\underline{x_r} \le x_r \le \overline{x_r} \;\; \forall \, x_r \in \mathbf{X} \quad (3)$$

где $\{\underline{x}, \bar{x}\}$ – нижние и верхние граничные значения длительности регулирующих сигналов светофоров.

Разработанная многоагентная система реализована в среде AnyLogic с использованием встроенного Java API. Это обеспечило прямую интеграцию

алгоритмов оптимизации с агентной архитектурой модели и позволило реализовать единый контур «моделирование - оптимизация - выработка рекомендаций (СППР) по параметрам фаз». При этом речь идет о режиме имитационного эксперимента, а не о промышленном онлайн-управлении АСУДД.

Архитектура модели предусматривает интеграцию USS-PSO, ARGEN, EIO, HGSO, а также эталонных реализаций Swarm-PSO и GA-Parallel, рис. 4. Такая организация обеспечивает сопоставимость результатов, воспроизводимость экспериментов и автоматический расчёт показателей эффективности: среднего времени проезда, длины очередей, числа остановок и расхода топлива, табл. 1. Система функционирует как СППР для предпроектной настройки и анализа сценариев управления на уровне улично-дорожного участка.

Таблица 1 – Основные метрики эффективности работы

Метрика	Формула	Описание
Среднее время задержки ($\bar{T}$)	$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_i}{N}$	Среднее время нахождения автомобиля в состоянии ожидания перед разрешающим сигналом светофора. Вычисляется автоматически в среде AnyLogic как разность между временем прибытия к стоп-линии и моментом начала движения.
Средняя длина очереди ($\bar{L}$)	$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^{N} L_i}{N}$	Средняя длина затора в метрах, вычисляемая по текущим координатам агентов-автомобилей, выстроенных в очередь перед перекрёстками. Учитываются все типы транспортных средств, нормированные по длине кузова.
Число остановок ($\bar{S}$)	$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_i}{N}$	Среднее количество вынужденных остановок, зафиксированных системой при падении скорости автомобиля ниже порогового значения (0,5 м/с). Все события фиксируются встроенными средствами AnyLogic и относятся к вынужденным, т.е. вызванным ограничениями на движение (сигналы, заторы).
Пропускная способность ($\bar{G}$)	$\bar{G} = \frac{\sum_{i=1}^{N} C_i}{T}$	Количество автомобилей, успешно пересёкших контрольную линию перекрёстков за интервал симуляции.
Потери топлива ($\bar{F}$)	$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^{N} GasUsage_i}{N}$	Средний объём топлива, израсходованный всеми автомобилями за цикл регулирования. Рассчитывается встроенной функцией энергопотребления AnyLogic с использованием эмпирических коэффициентов расхода для разных классов ТС.

Здесь $i = 1,2,\dots,N$– индекс агента-автомобиля; N – общее количество транспортных средств; T_i – время задержки; L_i– длина очереди (в метрах, с учётом нормализованной длины ТС); S_i – количество остановок; C_i – признак прохождения контрольной линии i-м автомобилем (1 - прошёл, 0 - нет) ; $GasUsage_i$– индивидуальный расход топлива. Все показатели автоматически регистрируются средствами AnyLogic и используются для

сопоставления шести адаптивных моделей управления в одинаковых условиях моделирования.

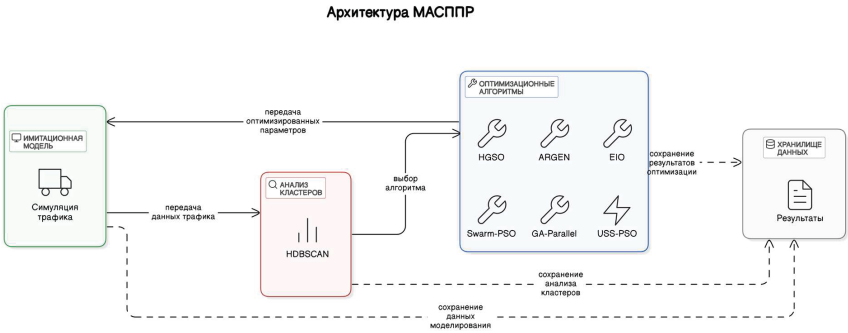


Рисунок 4 – Архитектурная схема многоагентной системы поддержки принятия решений.

В **третьей главе** реализованы и исследованы два базовых алгоритма: Swarm-PSO (классический PSO) и GA-Parallel (параллельный генетический алгоритм), которые используются как репрезентативные эталоны для сопоставления с разработанными гибридными схемами (USS-PSO, ARGEN, EIO, HGSO).

В работе каждая связка «имитационная модель + оптимизационный модуль» рассматривается как самостоятельная адаптивная модель управления. Это обеспечивает корректное сравнение алгоритмов в идентичных условиях, поскольку структура транспортной модели остаётся неизменной, а различия между моделями определяются исключительно механизмами оптимизации.

Помимо этого, автором разработан алгоритм USS-PSO (управляемый стохастический сдвиг), представляющий собой модификацию метода роя частиц. В алгоритме реализован адаптивный направленный стохастический сдвиг с использованием коэффициента $\lambda(t)$, изменяющегося в зависимости от динамики улучшения целевой функции. Частица в данном случае рассматривается как вектор параметров управления, включающий длительности фаз светофорного регулирования. Такой механизм позволяет повысить устойчивость поиска и снизить риск преждевременной сходимости в условиях стохастичности транспортного потока.

Для оптимизации также использованы три гибридных алгоритма: адаптивное рой-генетическое чередование (ARGEN), эволюционно-интегрированная оптимизация (EIO) и гибридный рой-генетический алгоритм с адаптивным коэффициентом (HGSO). ARGEN обеспечивает динамическое чередование фаз генетического и роевого поиска, что позволяет эффективно преодолевать локальные минимумы. EIO сочетает механизмы роя частиц с генетическими операторами кроссовера и мутации, повышая разнообразие решений и устойчивость алгоритма. HGSO использует адаптивное изменение коэффициента влияния роевого и генетического компонентов в зависимости от

стадии поиска, сохраняя баланс между глобальной и локальной оптимизацией. Параметры алгоритмов подбирались с учетом качества решений, устойчивости поиска и вычислительных затрат.

Для повышения адаптивности в процессе поиска применяется линейное уменьшение веса инерции: на ранних итерациях инерционный коэффициент поддерживается высоким для расширенного исследования пространства, а на поздних – снижается, обеспечивая точную сходимость. Такая схема, реализованная как модификация стандартного PSO, повышает устойчивость к преждевременной сходимости и улучшает результаты в многомерных задачах оптимизации.

Для решения задачи оптимизации параметров светофорного регулирования предложен комплекс оригинальных гибридных эволюционных алгоритмов, обеспечивающих эффективный поиск решений в условиях стохастичности и высокой размерности транспортных задач. Центральное место среди них занимает алгоритм управляемого стохастического сдвига (USS-PSO) – разработанная автором модификация метода роя частиц, в которой реализован механизм направленного стохастического подтягивания частиц к глобальному экстремуму с учётом динамики изменения целевой функции. Схема функционирования алгоритма представлена на рис. 5, где визуализировано влияние параметров адаптивного сдвига на траекторию поиска оптимального решения.

В отличие от классических реализаций PSO, алгоритм USS-PSO демонстрирует высокую устойчивость к преждевременной сходимости и обеспечивает ускоренный поиск более точных решений при многокритериальной оптимизации. В рамках настоящего исследования выполнена полная интеграция USS-PSO с многоагентным имитационным моделированием, что позволило реализовать динамическую адаптацию параметров светофорного регулирования в ходе имитационного моделирования без остановки симуляции, что повышает практическую применимость предложенного подхода.

Математически поведение частиц в USS-PSO описывается следующей системой уравнений:

$$v_{ij}^{(t+1)} = w v_{ij}^{(t)} + c_1 r_1 \cdot \left(p_{ij}^{best} - x_{ij}^{(t)}\right) + c_2 r_2 \cdot \left(g_j^{best} - x_{ij}^{(t)}\right) + \lambda(t) r_3 \left(g_j^{best} - x_{ij}^{(t)}\right) \quad (4)$$

$$x_{ij}^{(t+1)} = x_{ij}^{(t)} + v_{ij}^{(t+1)} \quad (5)$$

где:

- w – коэффициент инерции, регулирующий баланс между исследованием пространства и уточнением найденных решений;
- c_1, c_2 – коэффициенты ускорения, задающие влияние личного и глобального опыта частицы;
- $r_1, r_2, r_3 \sim U(0,1)$ – случайные числа из диапазона, обеспечивающие стохастичность поиска;
- p_{ij}^{best} – личное лучшее найденное значение частицы i по параметру j;
- g_j^{best} – глобально лучшее найденное значение по параметру j;

- $\lambda(t)$ – адаптивный коэффициент направленного стохастического сдвига, регулирующий степень притяжения частицы к глобальному оптимуму.

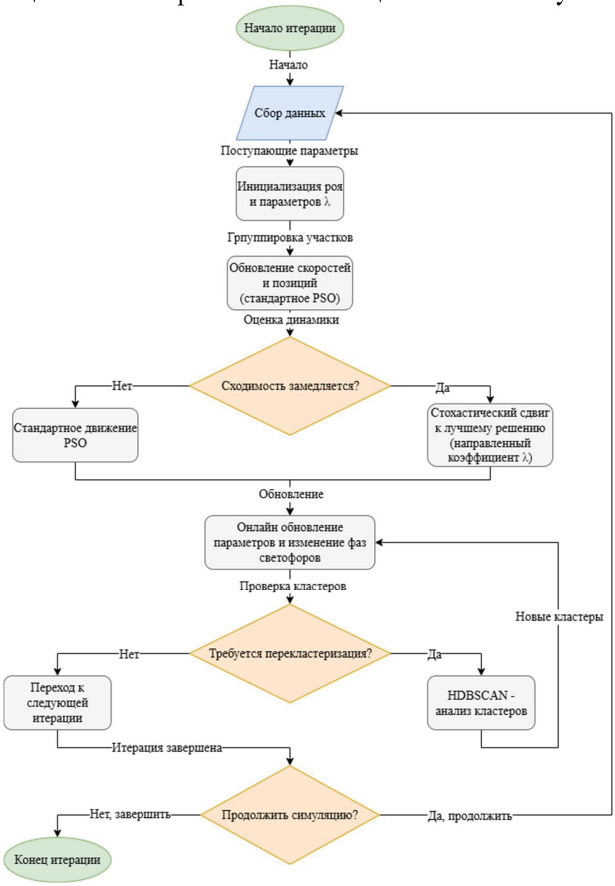


Рисунок 5 – Схема работы USS-PSO

Для обеспечения адаптивности поиска коэффициент $\lambda(t)$ изменяется в зависимости от динамики улучшения целевой функции. При стагнации *λ(t)* увеличивается, усиливая направленное подтягивание к лучшему найденному решению и стабилизируя сходимость в шумной целевой функции; при устойчивом улучшении *λ(t)* уменьшается, чтобы избежать чрезмерной концентрации роя и сохранить разнообразие.

Эволюция коэффициента описывается выражением:

$$\lambda(t+1) = \lambda(t)\left(1 - \frac{|\, F_{best}(t) - F_{best}(t-1)\,|}{F_{best}(t) + \delta}\right) \qquad (6)$$

где $F_{best}(t)$– текущее наилучшее значение целевой функции,

$|F_{best}(t) - F_{best}(t-1)|$ – модуль изменения глобального лучшего значения между двумя последовательными итерациями, характеризующий темп улучшения решения,

$\delta > 0$ – малый стабилизирующий параметр, исключающий вырожденные значения при малых $F_{best}(t)$.

Из данного выражения следует, что при существенном улучшении значения целевой функции коэффициент $\lambda(t)$ уменьшается, снижая вклад направленного стохастического подтягивания частиц к текущему g^{best} и тем самым предотвращая чрезмерную концентрацию роя в окрестности найденного экстремума. При замедлении улучшений изменение $\lambda(t)$ становится малым, и дополнительный направленный компонент сохраняется, обеспечивая устойчивую сходимость алгоритма в условиях стохастичности целевой функции. В реализации значение $\lambda(t)$ ограничивается интервалом $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$, что обеспечивает стабильность работы алгоритма.

В подразделе 3.4 рассмотрено применение фронта Парето для многокритериальной оптимизации. На рис. 6 приведена теоретическая иллюстрация распределения решений в пространстве критериев $\bar{T}$ и $\bar{L}$. Иллюстрация показывает принцип поиска компромисса между временем проезда и длиной очередей.

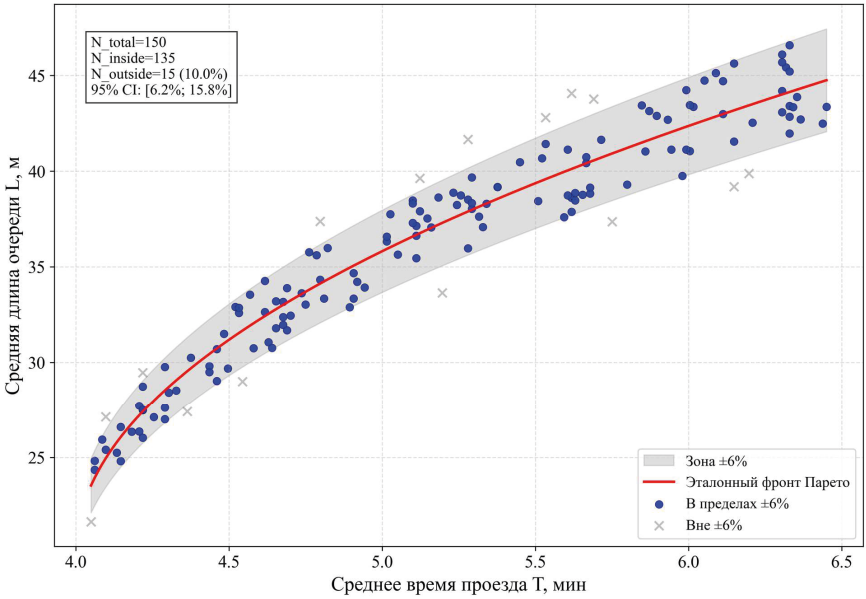


Рисунок 6 – Теоретическая модель распределения решений USS-PSO в пространстве критериев $\bar{T}$ и $\bar{L}$ относительно эталонного фронта Парето

В **четвертой главе** представлены результаты сравнения шести алгоритмов на имитационной модели при разных уровнях интенсивности движения. Рассмотрены качество найденных решений, сходимость, устойчивость и вычислительные затраты.

В работе предложена методика интеграции эволюционных алгоритмов оптимизации с многоагентной имитационной моделью AnyLogic. Оптимизационные алгоритмы управляют длительностями фаз светофоров в рамках имитационного эксперимента, а сама модель используется для расчёта целевых показателей. Для сопоставления результатов введён базовый нормативный режим без применения эволюционной оптимизации. Длительности фаз, структура разрешающих и запрещающих интервалов, минимальные значения зелёных и межзелёных периодов, а также принципы координации задавались с учётом ОДМ 218.6.003-2011, ОДМ 218.2.072-2016, ГОСТ Р 52289-2019, ГОСТ Р 57144-2016, ГОСТ Р 57145-2016 и ОДН 218.0.006-2002. Сравнение базового и оптимизированного режима USS-PSO приведено в табл. 2.

Таблица 2 – Сравнение базового нормативного режима светофорного регулирования и оптимизированного режима USS-PSO

Уровень интенсивности	**Режим светофорного регулирования**	**Среднее время проезда ($\bar{T}$), мин**	**Средняя длина очереди ($\bar{L}$), м**	**Число остановок ($\bar{S}$), ед.**	**Потери топлива ($\bar{F}$), л**
Низкая	Базовый режим по ОДМ/ГОСТ (неоптимизированный)	1,30	10,0	2,1	0,98
	Оптимизированный режим USS-PSO	1,12	7,6	1,3	0,76
Средняя	Базовый режим по ОДМ/ГОСТ (неоптимизированный)	3,02	22,1	4,3	2,81
	Оптимизированный режим USS-PSO	2,42	16,9	2,6	2,16
Высокая	Базовый режим по ОДМ/ГОСТ (неоптимизированный)	5,90	38,5	7,4	5,70
	Оптимизированный режим USS-PSO	5,06	31,9	5,6	4,78

Статистическая устойчивость алгоритмов сопоставлена по среднеквадратическому отклонению и коэффициенту вариации четырех показателей эффективности (табл. 3).

Таблица 3 – Статистическая устойчивость алгоритмов

Алгоритм	Среднее $\sigma_{\overline{T}}$	$V_{\overline{T}}$, %	Среднее $\sigma_{\overline{L}}$	$V_{\overline{L}}$, %	Среднее $\sigma_{\overline{S}}$	$V_{\overline{S}}$, %	Среднее $\sigma_{\overline{F}}$	$V_{\overline{F}}$, %
USS-PSO	**0,12**	**2.37%**	**1,04**	**3.26%**	**0,24**	**3.99%**	**0,11**	**2.30%**
HGSO	**0,19**	**3.67%**	**1,23**	**3.85%**	**0,32**	**5.10%**	**0,17**	**3.42%**
ARGEN	**0,22**	**4.12%**	**1,38**	**4.32%**	**0,37**	**5.88%**	**0,20**	**4.01%**
EIO	**0,25**	**4.67%**	**1,45**	**4.61%**	**0,42**	**6.45%**	**0,23**	**4.63%**
Swarm-PSO	**0,34**	**6.21%**	**1,87**	**5.89%**	**0,56**	**8.12%**	**0,29**	**6.03%**
GA-Parallel	**0,41**	**7.38%**	**2,13**	**6.47%**	**0,64**	**9.56%**	**0,35**	**7.09%**

В рамках исследования отдельно оценивалась **робастность оптимальных параметров светофорного регулирования** по отношению к изменению поведенческих паттернов водителей, связанных с различной **частотой маневрирования (смены полосы движения)**. Распределения оптимальных длительностей зелёных и красных сигналов при вариации параметра β, характеризующего частоту маневрирования агентов, представлены на рис. 7.

Продольная динамика (car-following) и базовые правила движения реализуются стандартными механизмами Road Traffic Library среды AnyLogic, а параметр β используется для задания интенсивности поперечного маневрирования (lane-changing) в рамках библиотечных ограничений безопасности.

Для оценки робастности были выполнены повторяемые оптимизационные прогоны при трёх уровнях частоты маневрирования агентов (редкая, типичная и высокая смена полосы движения), суммарно 300 итераций для каждой модели оптимизации. В качестве средства визуализации использованы диаграммы размаха (*boxplot*), отражающие разброс оптимальных значений длительностей сигналов светофорного регулирования при неизменных сценариях интенсивности транспортного потока.

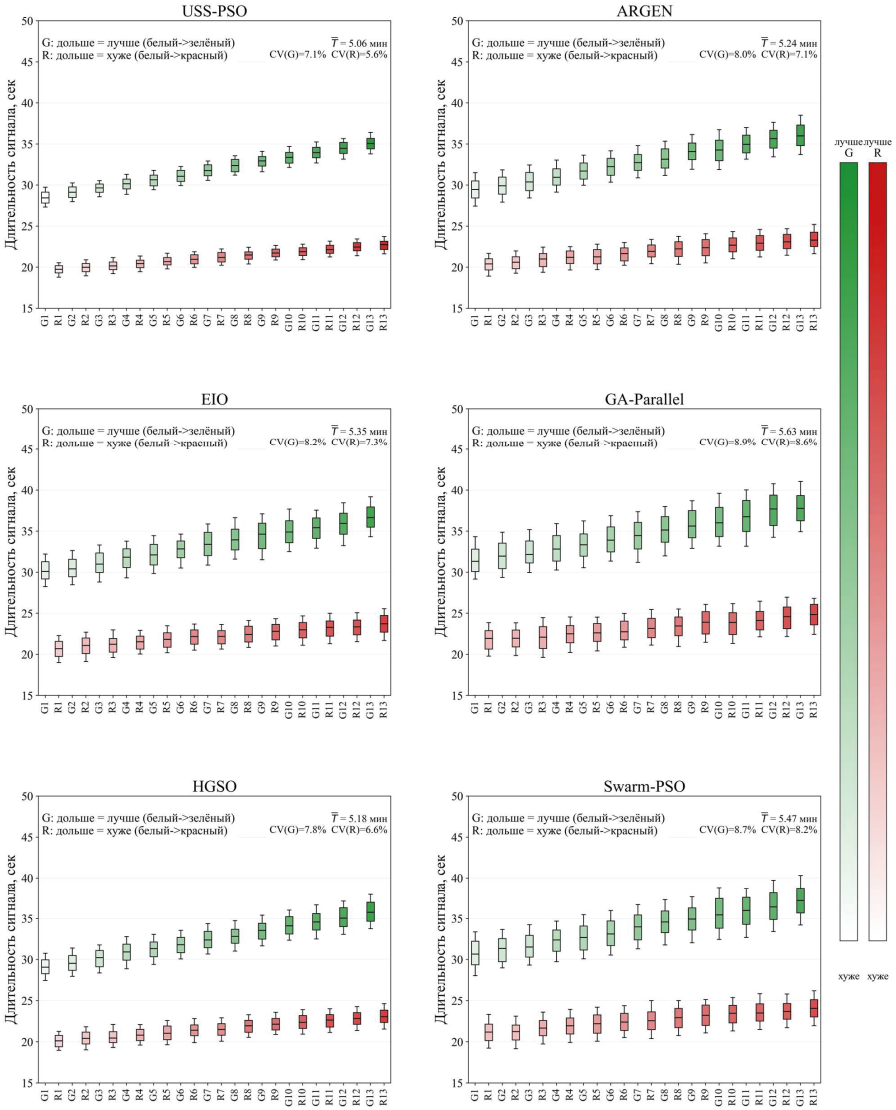


Рисунок 7 – Распределения оптимальных длительностей зелёных и красных сигналов светофоров при вариации частоты маневрирования агентов для различных алгоритмов оптимизации

Сравнение проводилось в рамках одной вычислительной архитектуры, что позволило оценить вклад USS-PSO в повышение адаптивности и устойчивости управления. Дополнительно выполнен анализ вычислительной устойчивости МАСППР при росте числа светофорных комплексов и транспортных агентов.

Области устойчивой работы системы для различных уровней вычислительных ресурсов представлены на рис. 8 и рис. 9.

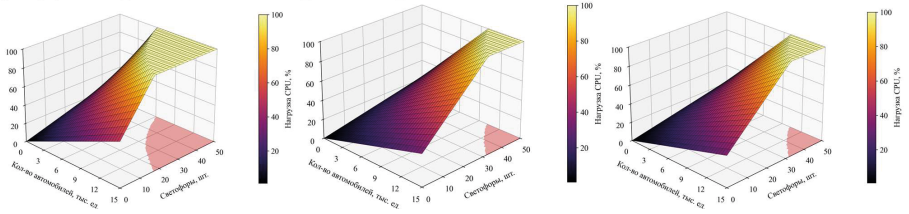


Рисунок 8 – Область стабильной работы МАСППР на конфигурации CPU класса 1 (4C/4T, 3.2 ГГц), 2 (8C/8T, 4.6 ГГц) и 3 (16C/32T, 5.7 ГГц)

Для оценки масштабируемости разработанной МАСППР выполнен анализ вычислительной устойчивости при росте числа светофорных комплексов N_s и транспортных агентов N_v. На рис. 9 показана двумерная проекция эмпирической зависимости $U(N_s, N_v)$ на плоскость (N_s, N_v): нанесены критические кривые $N_v^{crit}(N_s)$ для трёх классов вычислительных узлов. Области ниже соответствующих кривых отражают режимы, в которых система успевает выполнять оптимизационный контур в пределах заданного временного бюджета (режим “реального времени” на одном вычислительном узле выбранного класса). Нижняя граница соответствует i5-6500 и задаёт область гарантированной вычислительной устойчивости; переход к i7-9700KF и Ryzen 9 9950X последовательно расширяет допустимые сочетания (N_s, N_v). Построенные границы используются для формализации области применимости и анализа масштабируемости МАСППР на типовых городских участках (подраздел 4.4.3 диссертации).

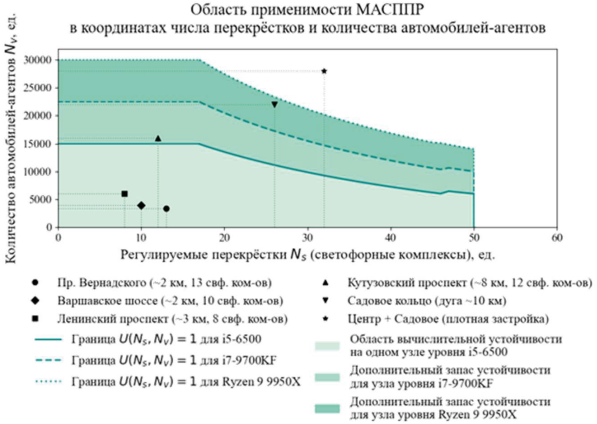


Рисунок 9 - Область вычислительной устойчивости МАСППР в координатах числа светофорных комплексов N_s и автомобилей-агентов N_v для различных уровней вычислительных ресурсов (i5-6500, i7-9700KF, Ryzen 9 9950X)

Разработанная МАСППР ориентирована на исследовательские задачи оптимизации параметров светофорного регулирования на уровне локальных улично-дорожных участков.

В заключении сформулированы основные выводы и приведены результаты исследования.

1. Предложена и экспериментально апробирована методика предварительной оптимизации параметров светофорного регулирования, основанная на интеграции многоагентного имитационного моделирования и эволюционных алгоритмов. Апробация на имитационной модели участка городской сети с 13 регулируемыми перекрёстками показала **улучшение эффективности управления транспортными потоками на 11–15 % по ключевым показателям** по сравнению с базовыми алгоритмами PSO и GA.

2. Разработан и экспериментально реализован алгоритм управляемого стохастического сдвига (USS-PSO) – модификация алгоритма роя частиц с адаптивным механизмом направленного подтягивания частиц к глобальному экстремуму. Алгоритм обеспечивает **снижение вероятности застревания в локальных экстремумах и ускоренную сходимость** при решении многокритериальных задач оптимизации в динамических транспортных системах. Полученные данные подтверждают **высокую статистическую устойчивость и воспроизводимость результатов**, что отражено в таблице 3.

3. Разработана многоагентная система поддержки принятия решений по управлению транспортными потоками, реализованная в среде AnyLogic и обеспечивающая автоматическую настройку параметров светофорного регулирования в ходе имитационного моделирования. В единое программное ядро системы интегрированы алгоритмы USS-PSO, ARGEN, EIO и HGSO, реализующие различные принципы адаптации эволюционного поиска и не требующие использования внешних API и сенсорной инфраструктуры.

4. Экспериментально подтверждена устойчивость оптимальных параметров светофорного регулирования к вариации поведения транспортных агентов, включая частоту их маневрирования, что свидетельствует о **применимости предложенных решений в условиях стохастичности и поведенческой неоднородности транспортного потока**.

Результаты исследования подтверждены публикациями автора и экспериментальной реализацией в рамках проекта РНФ № 23-11-00080.

В **приложениях** приведены блок-схемы алгоритмов, программный код и результаты дополнительных вычислительных экспериментов.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в научных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 2.3.8, включая издания, индексируемые в Web of Science / Scopus:

1. 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. *(Перечень рецензируемых научных изданий ВАК от 10.06.2024 №306, WoS/Scopus)*
2. Зарипов Е.А., Акопов А.С. Моделирование и оптимизация характеристик интеллектуальной транспортной системы «умного города» с использованием гибридных эволюционных алгоритмов // *Бизнес-информатика*. 2025. Т. 19. № 1. С. 34–49. DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.34.49. *(Перечень рецензируемых научных изданий ВАК от 05.02.2025 №318, WoS/Scopus)*
3. 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. 2024. Т. 30. № 4. С. 183–189. DOI: 10.17587/it.30.183-189. *(Перечень рецензируемых научных изданий ВАК от 20.02.2024 №1398)*
4. Зарипов Е.А., Новашинский Я.М., Харитонов А.Н. Перспективы внедрения технологий искусственного интеллекта в городской транспорт // Информационные системы и технологии. 2024. № 6(146). С. 56–61. EDN: UYAUJI. *(Перечень рецензируемых научных изданий ВАК от 30.10.2024 №1458)*

Публикации в других изданиях (конференции, сборники, РИНЦ и прочее):

Опубликовано **11 работ** в сборниках трудов всероссийских и международных конференций, индексируемых в РИНЦ, включая:

5. Зарипов Е.А., Акопов А.С. Оптимизация транспортных потоков в многоагентных интеллектуальных транспортных системах с использованием роевых и генетических алгоритмов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2025): труды XII Всероссийской научно-практической конференции, 15–17 октября 2025 г. – СПб.: АО «ЦТСС», 2025. – С. 693–698.
6. Зарипов Е.А., Мельников А.М., Акопов А.С. Методы управления транспортными потоками на основе генетических алгоритмов, роевых алгоритмов и нейросетей // Социально-гуманитарные проблемы образования и профессиональной самореализации (Социальный инженер-2024): сборник материалов Международной научной конференции молодых исследователей. – Ч. 5. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2025. – С. 168–171.
7. Зарипов Е.А., Мельников А.М. Инновации в образовании с AnyLogic: оптимизация и устойчивость на примере транспортных потоков в локальных участках уличной дорожной сети // Социально-гуманитарные проблемы образования и профессиональной самореализации (Социальный инженер-2023): сборник материалов Международной научной конференции молодых исследователей. – Ч. 4. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – С. 137–141.
8. Зарипов Е.А., Акопов А.С. Комбинирование роевых и генетических алгоритмов для решения задач оптимизации: подходы, методы и перспективы // Глобальные научные тенденции: интеграция и инновации: сборник статей VII Международной научно-практической конференции. – Саратов: Цифровая наука, 2024. – С. 50–60.
9. Зарипов Е.А. Возможности интеграции и симуляции интеллектуальных систем в управлении умными городами: синергия между многоагентным подходом и нейронными сетями // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2024): сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием. – Ч. 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. – С. 271–277.
10. Зарипов Е.А., Акопов А.С. Агентный подход к моделированию виртуальных образовательных сред // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2023): сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых

исследователей с международным участием. – Ч. 4. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – С. 139–147. – EDN RNKEGW.
11. Замошников А.А., Зарипов Е.А., Прокофьев С.Я. Анализ возможностей применения искусственного интеллекта в IT образовании // Социально-гуманитарные проблемы образования и профессиональной самореализации (Социальный инженер-2023): сборник материалов Международной научной конференции молодых исследователей. – Ч. 3. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – С. 251–254.
12. Александриди-Шандаевский Е.Д., Зарипов Е.А. Применение промпт-инжиниринга для работы с GLM моделями // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2024): сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием. – Ч. 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. – С. 145–150.
13. Гусак В.С., Зарипов Е.А., Куппа М.Н. Анализ применения СУБД Tarantool в высших учебных заведениях в условиях импортозамещения // Социально-гуманитарные проблемы образования и профессиональной самореализации (Социальный инженер-2023): сборник материалов Международной научной конференции молодых исследователей. – Ч. 3. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – С. 242–246.
14. Малютина В.А., Зарипов Е.А. Mobile Backend as a Service (MBAAS): выбор облачного сервиса для разработки бэкенда мобильных приложений в 2023 г. // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2023): сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием. – Ч. 4. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – С. 239–243. – EDN FPPLRM.
15. Замошников А.А., Зарипов Е.А., Попов А.В. Анализ влияния медиапространства и сквозных информационных технологий на современное общество // Социально-гуманитарные проблемы образования и профессиональной самореализации (Социальный инженер-2022): сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием. – Ч. 8. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. – С. 72–77. – EDN XNEJRW.

Для заметок

Для заметок

Подписано в печать 16.11.2026
Формат 148x210 мм
Объем 1,0 усл.печ.л.
Тираж 100 шт.
Заказ № Отпечатано в типографии «Континенталь»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 17, стр. 1