

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ПРИОРИТЕТА МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА МЕТОДАМИ АДАПТИВНОГО СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И БЕСПРОВОДНОЙ ДЕТЕКЦИИ

ЛЮ ЮЙВЭЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Предложен комплексный научно-практический метод повышения эффективности функционирования маршрутного пассажирского транспорта на регулируемых перекрестках на основе синергии пространственного обособления и адаптивного светофорного регулирования. Сформулирована целевая функция минимизации суммарных социальных потерь времени, а также аналитическая модель оценки влияния надежности беспроводного канала передачи данных V2X (LTE) на экономическую эффективность приоритетного пропуска. На основе имитационного моделирования в среде SUMO доказана высокая работоспособность разработанных алгоритмов и определены пределы их устойчивости к флуктуациям неоднородности потока.

Ключевые слова: адаптивное светофорное регулирование, приоритет МПТС, шлюзовой накопитель, надежность связи, V2X, имитационное моделирование, транспортная задержка, социальные потери времени.

Введение. Обеспечение приоритетных условий движения маршрутных пассажирских транспортных средств (МПТС) на регулируемых перекрестках является ключевым вектором развития интеллектуальных транспортных систем (ИТС) современных мегаполисов [1–4]. Классические градостроительные методы, такие как простое уширение проезжей части или создание выделенных полос без разделения на функциональные зоны, теряют свою эффективность в условиях высокой плотности застройки и стохастического проникновения на приоритетную инфраструктуру сторонних видов транспорта (включая личные электромобили), поэтому и необходимы иные методы [6–9].

Аналитически доказано, что при доле стороннего транспорта на полосе МПТС свыше 7,14% геометрическая емкость шлюзовых накопителей полностью исчерпывается, приводя к блокировке физических детекторов. В связи с этим возникает необходимость разработки гибких систем управления, сочетающих пространственную конфигурацию уличного пространства с временным (светофорным) адаптивным регулированием (АСФР), способным гибко реагировать на динамику гетерогенного транспортного потока [5].

Целью настоящей статьи является разработка, верификация и технико-экономическое обоснование алгоритмов АСФР, обеспечивающих проактивный бесконфликтный пропуск смешанного (рельсового и безрельсового) МПТС через регулируемые перекрестки с учетом надежности каналов связи.

Основная часть. Математическая формализация критерия оптимизации АСФР. Эффективность любого алгоритма ИТС детерминирована выбором целевой функции. Традиционные подходы, ориентированные на минимизацию задержек исключительно транспортных единиц, демонстрируют несостоятельность в концепции устойчивой городской мобильности, поскольку игнорируют пассажиронапряженность различных направлений¹. Предложена и математически формализована целевая функция минимизации суммарных социальных потерь времени $J_{\min}$, выраженных в пассажиро-часах за один час функционирования транспортного узла:

$$J_{\min} = \sum_{j=1}^K (W_{\text{мптс}} \cdot Q_{\text{мптс},j} \cdot D_{\text{мптс},j}) + \sum_{n=1}^M (W_{\text{лгк}} \cdot q_{\text{лгк},n} \cdot d_{\text{лгк},n}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $W_{\text{мптс}}, W_{\text{лгк}}$ – весовые коэффициенты среднего пассажирского наполнения для приоритетных (МПТС) и неприоритетных (легковых) транспортных средств соответственно, пасс./ед. (принято в расчетах: $W_{\text{мптс}} = 85$ пасс./ед. для автобуса/троллейбуса, $W_{\text{лгк}} = 1,4$ пасс./ед. для легкового автомобиля); $Q_{\text{мптс},j}$ – интенсивность движения МПТС по приоритетному направлению j , ед./ч; $q_{\text{лгк},n}$ – интенсивность движения легковых автомобилей по направлению n , ед./ч; $D_{\text{мптс},j}, d_{\text{лгк},n}$ – средняя задержка одной транспортной единицы на перекрестке по соответствующим направлениям, ч (при использовании выходных параметров имитационного моделирования в секундах, значения делятся на 3600).

Физический смысл уравнения (1) заключается в поиске компромисса между предоставлением безусловного приоритета высоконаполненному общественному транспорту и недопущением транспортного коллапса на смежных транзитных направлениях перекрестка.

Разработка универсального алгоритма АСФР и модели надежности детекции V2X. Для реализации критерия (1) на регулируемых перекрестках со смешанным составом МПТС (например, пересечение ул. Плеханова – ул. Тухачевского в г. Минске) разработан алгоритм гибкого регулирования по принципу «actuated control» с возможностью вызова специальной фазы и передачи неиспользованного времени.

¹ National Association of City Transportation Officials (NACTO). Transit Street Design Guide. – Washington, DC: Island Press, 2016. – 328 p.

Запрос на обслуживание МПТС формируется логическим датчиком *AdvRoWRsrv* (Advance Right of Way Reservation), интегрирующим данные от двух физических детекторов: въезда (check-in), установленного на удалении $L_{\text{дет}} = 180$ м от стоп-линии, и выезда (check-out), расположенного у стоп-линии.

В реальных условиях эксплуатации эффективность алгоритма критически зависит от своевременности передачи радиосигнала по технологии V2X (LTE) от бортового модуля МПТС к дорожному контроллеру. Вследствие радиочастотной интерференции в плотной городской застройке пакеты данных могут теряться. Автором предложена аналитическая модель оценки надежности связи.

Временной резерв $\Delta t_{\text{рез}}$, доступный для передачи и гарантированной обработки запроса контроллером до момента фактического торможения МПТС перед стоп-линией, определяется как

$$\Delta t_{\text{рез}} = \frac{L_{\text{дет}}}{v_{\text{мптс}}} - t_{\text{обр}} \quad (2)$$

где $L_{\text{дет}}$ – расстояние от точки радиозапроса до стоп-линии, м; $v_{\text{мптс}}$ – скорость МПТС на подходе, м/с; $t_{\text{обр}}$ – время, необходимое контроллеру на безопасное завершение текущей фазы (минимальные зеленые, промтакты), с (принято $t_{\text{обр}} = 1,5$ с). При $L_{\text{дет}} = 35$ м и $v_{\text{мптс}} = 50$ км/ч (13,9 м/с) полученный резерв составляет $\Delta t_{\text{рез}} \approx 1,02$ с.

Принимая задержку передачи пакетов, распределенной по экспоненциальному закону со средним значением μ (с), вероятность алгоритмического отказа приоритета $P_{\text{отказ}}(\mu)$ выражается зависимостью

$$P_{\text{отказ}}(\mu) = e^{-\frac{\Delta t_{\text{рез}}}{\mu}}. \quad (3)$$

Следовательно, фактический годовой экономический эффект внедрения ИТС ($\mathcal{E}_{\text{факт}}$) линейно убывает при снижении надежности беспроводного канала:

$$\mathcal{E}_{\text{факт}}(\mu) = \mathcal{E}_{\text{нах}} \cdot (1 - P_{\text{отказ}}(\mu)), \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_{\text{нах}}$ – теоретический максимальный экономический эффект при стабильном сигнале.

Имитационное моделирование и анализ результатов. Для оценки эффективности разработанных алгоритмических и пространственно-временных решений проведена серия экспериментов в программном комплексе имитационного микромоделирования SUMO (Simulation of Urban MObility), имеющимся на кафедре «Транспортных систем и технологий» БНТУ. Моделирование выполнялось на примере регулируемого перекрестка со смешанным составом МПТС (ул. Плеханова – ул. Тухачевского в г. Минске). Чтобы минимизировать влияние стохастических факторов симуляции и гарантировать статистическую значимость результатов, для каждого сценария было реализовано не менее 21 прогона со случайными параметрами распределения потоков (при доверительном интервале 95%). Результаты расчета суммарных транспортных задержек на узле за 1,5-часовой расчетный период моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Суммарные транспортные задержки на узле до и после внедрения АСФР

Категория ТС	Существующие условия, авт.·ч	Предлагаемый Вариант 1 (фикс. активация), авт.·ч	Предлагаемый Вариант 2 (сокращение времени), авт.·ч	Снижение задержки (Вариант 1), %
МПТС (автобусы)	0,63	0,47	0,49	25,4%
Транзитный поток	26,79	25,69	25,42	4,1%
Поворотный поток	12,99	11,75	11,80	9,5%

Анализ результатов моделирования показывает, что практическая реализация первого варианта АСФР (фиксация запроса приоритета без сокращения фазы) обеспечивает снижение суммарных задержек для МПТС на 25,4%. При использовании второго варианта регулирования (с гибким сокращением неиспользованного зеленого времени) задержки общественного транспорта сокращаются на 21,3%.

Незначительное изменение задержек транзитных легковых автомобилей (снижение составило всего 4,1%) указывает на высокую сбалансированность предложенных алгоритмов светофорного регулирования и отсутствие дестабилизирующего влияния на смежные направления движения. Сравнительные бокс-диаграммы распределения задержек транспортных средств по сценариям представлены на рисунке 1.

Для оценки влияния надежности канала V2X на экономические критерии окупаемости построена зависимость (рисунок 2), полученная в ходе интеграции уравнений (3), (4) и сметной стоимости оборудования.

При задержках пакетов в диапазоне $\mu = 1..2$ с, характерных для зон высокой интерференции, годовой экономический эффект снижается в 1,6–2,5 раза (с 20697 до 8269 у.е./год), а расчетный срок окупаемости капитальных вложений ($K_{\text{кап}} = 4641$ у.е.) возрастает с 82 до 205 дней (таблица 2, рисунок 3).

Полученные данные доказывают необходимость технического резервирования беспроводного канала V2X дублирующими физическими индуктивными петлями на подходах к перекресткам при проектировании ИТС.

Практическое применение критерия оптимизации (1) при расчетных значениях коэффициентов пассажиро-наполняемости $W_{\text{мптс}} = 85$ пасс./ед. (для автобусов и троллейбусов) и $W_{\text{лгк}} = 1,4$ пасс./ед. (для легковых автомобилей) показывает, что традиционные подходы (ориентированные исключительно на снижение локальной задержки МПТС на 25,4%) не отражают реальный социальный эффект. Внедрение предложенных решений снижает

суммарные социальные потери времени $J_{\min}$ на 15,4% (со 109,2 до 92,4 пасс.-ч). Относительно меньшая величина снижения критерия $J_{\min}$ (15,4% против 25,4% задержки ТС) объясняется тем, что в исходных условиях общественный транспорт формирует около половины (49%) совокупных пассажиро-часов потерь, составляя при этом менее 2% от общего объема транспортного потока на узле (рисунок 3).

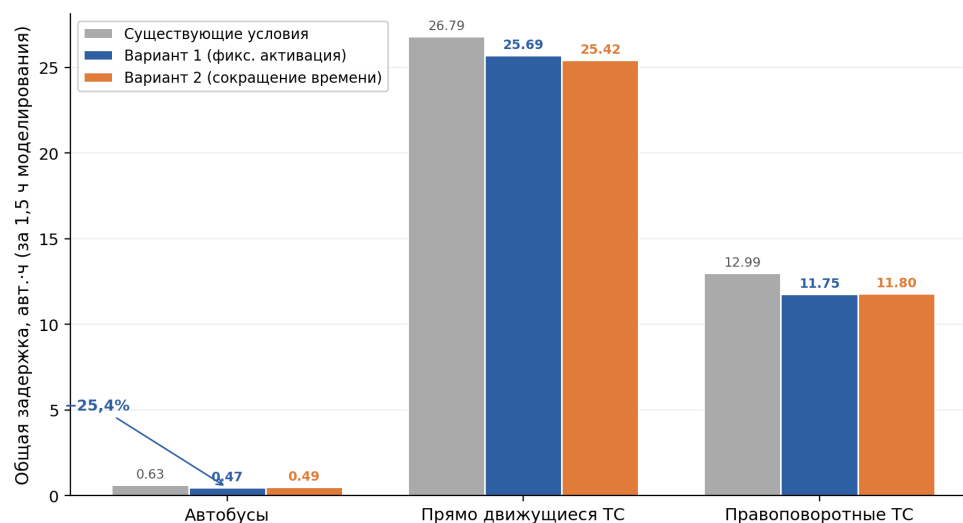


Рисунок 1. – Сравнение задержек транспортных средств по категориям до и после внедрения алгоритмов приоритета

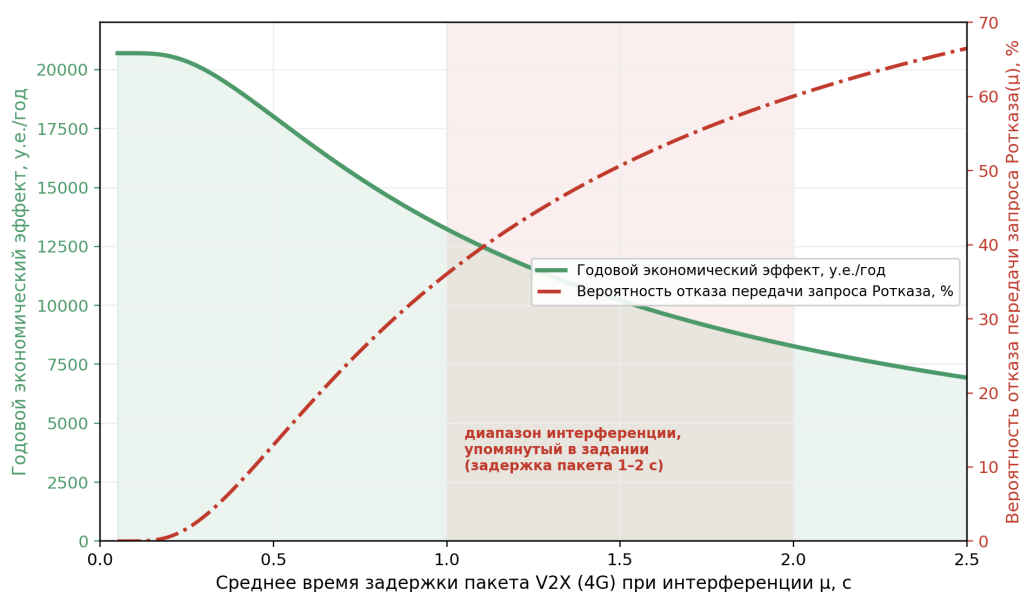


Рисунок 2. – Влияние задержки пакетов V2X на окупаемость и вероятность отказа приоритета

Таблица 2. – Срок окупаемости ИТС в зависимости от параметров задержки связи

Параметр связи μ , с	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Вероятность отказа $P_{\text{отказ}}$, %	0,0	13,0	36,1	50,7	60,0	66,5
Эффект, у.е./год	20 697	18 007	13 234	10 212	8 269	6 934
Срок окупаемости, дн.	82	94	128	166	205	244

Это подтверждает, что даже существенное сокращение задержек для малочисленной, но высоконаполненной категории МПТС оказывает лимитированное, хотя и весьма значимое влияние на общий социальный эффект. Полученный результат подчеркивает необходимость комплексного и одновременного учета условий движения индивидуального транспорта при проектировании приоритетных мероприятий ОДД. Поскольку величина средней наполняемости $W_{\text{МПТС}}$ принята в качестве модельного допущения, был проведен анализ чувствительности разработанной модели к изменению этого параметра в реалистичном диапазоне от 30 до 160 пасс./ед. (рисунок 4).

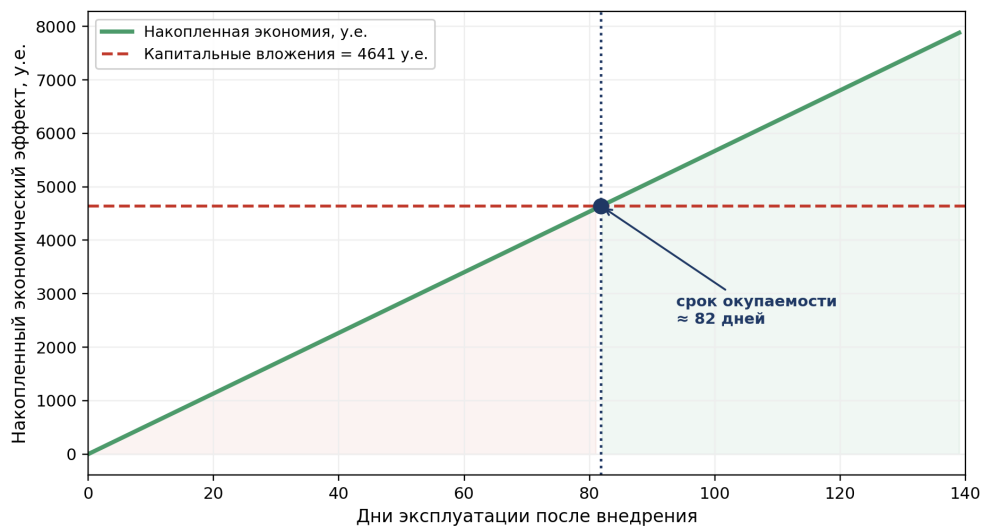
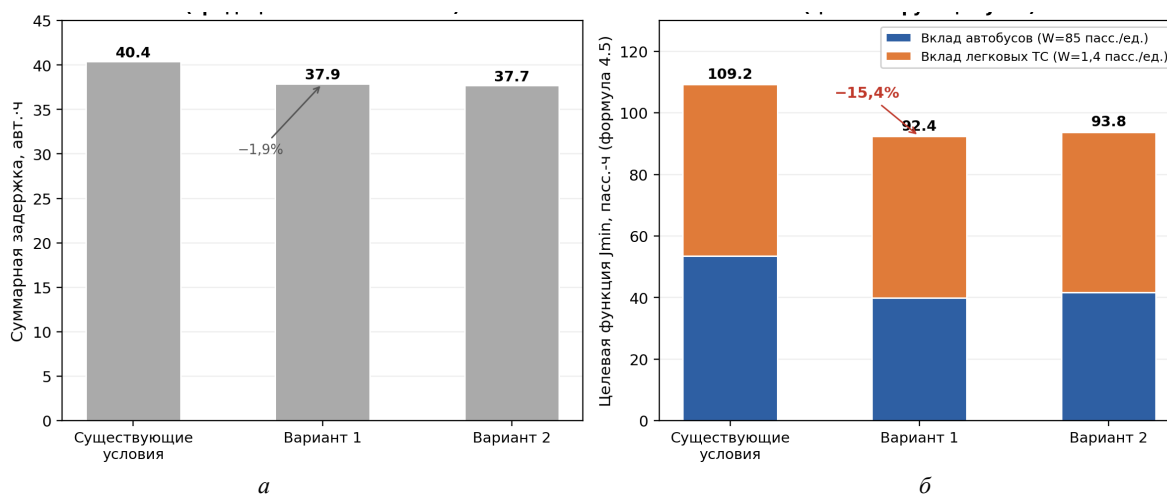
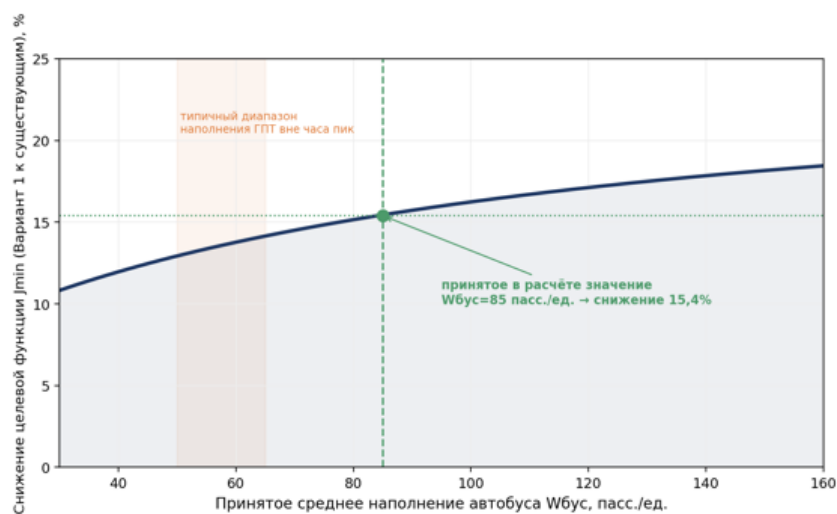


Рисунок 3. – Динамика окупаемости капитальных вложений в проектное решение



а – без учета наполнения (стандартный показатель); б – с учетом наполнения (целевая функция J_{min})

Рисунок 4. – Целевая функция минимизации социальных потерь времени J_{min} : сравнение с традиционным показателем задержки транспортных средствРисунок 5. – Устойчивость вывода о социальной эффективности к допущению о среднем пассажирском наполнении автобуса $W_{бус}$

Установлено, что эффект снижения целевой функции $J_{\min}$ монотонно возрастает с 12,9% до 18,2% при увеличении наполнения, оставаясь стабильно положительным на всем исследованном интервале. Это свидетельствует об устойчивости качественных выводов о высокой социальной эффективности предлагаемых решений независимо от вариации исходных допущений о наполнении подвижного состава (см. рисунок 5).

Заключение.

1. Разработаны универсальные алгоритмы адаптивного светофорного регулирования (АСФР), базирующиеся на целевой функции минимизации интегральных социальных потерь времени (пассажиро-часов). Алгоритмы обеспечивают бесконфликтный проезд смешанного состава МПТС за счет динамического перераспределения длительности фаз.

2. Имитационное моделирование в среде SUMO верифицировало высокую эффективность разработанного метода: задержки общественного транспорта снижаются на 21,3–25,4%, а общие экономические потери узла сокращаются на 6% при сроке окупаемости первоначальных капитальных вложений в среднем 82–94 дня.

3. Впервые аналитически формализована и доказана зависимость экономической окупаемости ИТС от надежности беспроводного канала связи V2X (LTE). Установлено, что рост средней задержки пакета до 1,5 с увеличивает срок окупаемости проекта в два раза (до 166 дней), что математически обосновывает необходимость обязательной укладки резервных индуктивных детекторов в полотно проезжей части.

4. Доказано, что бесперебойное функционирование алгоритмов АСФР возможно только при строгом обеспечении однородности приоритетного потока. Формирование очередей из личных электромобилей перед стоп-линиями в объеме более $p^* \approx 7,1\%$ полностью нивелирует работу ИТС, что требует внесения жестких изменений в нормативно-правовую базу (ПДД Республики Беларусь) в части запрета на допуск электромобилей на полосы МПТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В. Методология повышения качества дорожного движения. – Минск: БНТУ, 2018. – 372 с.
2. Vuchic V. R. Urban transit systems and Technology. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. – 150 p.
3. Капский Д.В. Транспорт в планировке городов: учеб. пособие / Белорусский национальный технический университет. – Минск: БНТУ, 2023. – 571 с.
4. Устойчивые транспортные системы городов: учеб. / Д.В. Капский, А.О. Лобашов, И.Н. Пугачев и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 128 с.
5. Garrow M., Machemehl R. Development and evaluation of transit signal priority strategies. – Austin: University of Texas, 1997. – 147 p.
6. Оценка качества алгоритмов адаптивного управления светофорными объектами методом имитационного моделирования / Ю. Лю, Д.В. Капский, С.А. Ляпин и др. // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-2(89). – С. 80–88. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-80-88
7. Лю Ю., Семченков С.С., Капский Д.В. Обеспечение приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта за счет устройства выделенных полос // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 1(51). – С. 49–52. DOI: 10.52928/2070-1616-2025-51-1-49-52
8. Лю Ю., Саражинский Д.С., Капский Д.В. Разработка и применение алгоритмов гибкого регулирования для повышения качества движения МТС на регулируемых перекрестках // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 2(52). – С. 42–52. DOI: 10.52928/2070-1616-2025-52-2-42-52
9. Капский Д.В. Разработка приложения для оценки экологического воздействия на транспортную систему мероприятий по ОДД // Проектирование, строительство и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры в сложных климатических и инженерно-геологических условиях: материалы междунар. науч.-практ. конф. / Москва (24–26 окт. 2024 г.). – М.: Дашков и К, 2024. – С. 102–104.

Поступила 20.07.2026

IMPROVING THE EFFICIENCY OF SPATIAL-TEMPORAL PRIORITY OF ROUTE PASSENGER TRANSPORT USING ADAPTIVE TRAFFIC LIGHT CONTROL AND WIRELESS DETECTION

LIU YUWEI

(Belarusian National Technical University, Minsk)

This article proposes a comprehensive scientific and practical method for improving the efficiency of route passenger transport at signalized intersections based on the synergy of spatial separation and adaptive traffic light control. An objective function for minimizing total social time losses is formulated, along with an analytical model for assessing the impact of the reliability of the V2X (LTE) wireless data transmission channel on the economic efficiency of priority passage. Simulation modeling in the SUMO environment demonstrates the high performance of the developed algorithms, and the limits of their resilience to flow fluctuations are determined.

Keywords: adaptive traffic light control, priority of MPTS, gateway storage, communication reliability, V2X, simulation modeling, transport delay, social time losses.