

ЛЮ ЮЙВЭЙ, САРАЖИНСКИЙ Д.С., КАПСКИЙ Д.В.

РАЗРАБОТКА ВАРИАНТА ГИБКОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОСТАНОВОЧНОГО ДВИЖЕНИЯ МАРШРУТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ЧЕРЕЗ РЕГУЛИРУЕМЫЙ ПЕРЕКРЕСТОК

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Приведен анализ существующих методов уменьшения вероятности возникновения блокировки движения маршрутных пассажирских транспортных средств на регулируемых перекрестках. На участке улично-дорожной сети в районе пересечения проспекта Независимости – проспекта Машерова – улицы Козлова разработаны алгоритмы гибкого управления для уменьшения блокировок движения маршрутных пассажирских транспортных средств другими транспортными средствами на базе интеллектуальных транспортных систем, а также предложены решения по применению современных средств управления светофорным регулированием. С помощью имитационного моделирования выполнена оценка результативности предложенных решений и их эффективности.

Ключевые слова: транспортный поток, регулируемый перекресток, маршрутное транспортное средство, гибкое регулирование, алгоритм управления

Введение

Маршрутный пассажирский транспорт играет важную роль в обеспечении мобильности жителей города и снижении нагрузки на дорожную сеть [1, 2]. Для повышения эффективности его работы в настоящее время повсеместно начинают применять выделение специальных полос движения, предназначенных для маршрутного пассажирского транспорта [3, 4]. Однако движение по специально выделенным полосам осложняется в зоне регулируемых перекрестков из-за блокировки данной полосы движения правоповоротными автомобилями. В результате маршрутные транспортные средства не могут своевременно проехать перекресток, накапливаются очереди, нарушается расписание движения, а пассажиры теряют время. Главной целью всех существующих подходов и методов организации движения маршрутного пассажирского транспорта является обеспечение эксплуатационной скорости, а также стабильности его работы, то есть точное выполнение установленного расписания движения [3, 4]. Среди самых распространенных можно выделить следующие [2, 5-7]. Применение выделенных полос для движения маршрутных транспортных средств (МТС) (рис. 1).

В большинстве случаев выделенная полоса для движения маршрутных транспортных средств уменьшает задержки, но в периоды пиковой загруженности дорог ситуация заметно осложняется. При интенсивном движении

правоповоротные автомобили могут создавать очереди, которые распространяются на полосу, предназначенную для маршрутного транспорта. В результате МТС вынуждены снижать скорость или полностью останавливаться, теряя то преимущество, которое должно обеспечивать наличие выделенной полосы. Особенно остро эта проблема проявляется в случаях, когда перекресток не оборудован специальными светофорными секциями для правоповоротных автомобилей или отсутствуют карманы (уширения) для маневрирования. (рис. 2).



Рисунок 1. Выделенная полоса для маршрутного пассажирского транспорта

Метод смещения выделенной полосы для маршрутного пассажирского транспорта, при котором выделенная полоса переносится с первой полосы движения на вторую (рис. 3).

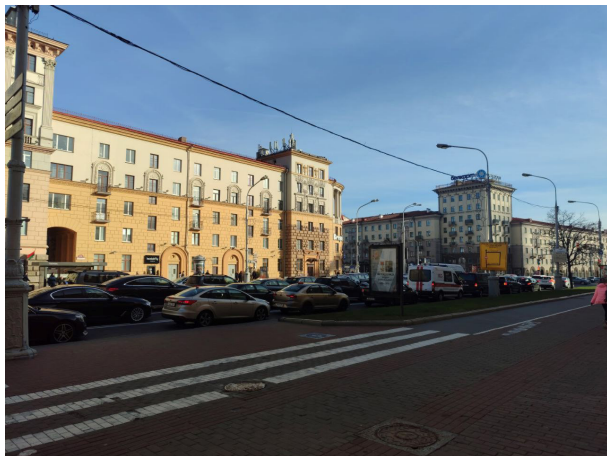


Рисунок 2. Протяженная очередь правоповоротных автомобилей на выделенной полосе (проспект Независимости)



Рисунок 3. Смещение выделенной полосы с организацией кармана для правоповоротных транспортных средств

Суть и причины применения метода смещения выделенной полосы заключаются в следующем: выделенная полоса для маршрутных транспортных средств (МТС) располагается на первой полосе, чаще всего крайней правой. При интенсивном движении и плотном пешеходном трафике на перекрёстках это приводит к частым блокировкам правоповоротными транспортными средствами. Правоповоротные автомобили, занимая первую полосу для поворота направо, вынуждены ожидать завершения движения пешеходов, что приводит к заторам и задержкам МТС на выделенной полосе.

Перемещение выделенной полосы на вторую полосу позволяет разгрузить первую полосу, выделив её для поворачивающего транспорта, и тем самым уменьшить время ожидания МТС на перекрёстках. Это способствует повышению эксплуатационной скорости маршрутного пассажирского транспорта и снижению общего времени поездки.

К основным преимуществам данного метода относится снижение конфликтов с правоповоротным транспортом непосредственно перед перекрёстком. Перемещение выделенной полосы на вторую полосу позволяет значительно уменьшить задержки на перекрёстках и блокировки маршрутного пассажирского транспорта.

Стоит отметить, что метод смещения выделенной полосы требует дополнительной

организации дорожного движения и наличия площадей.

Нужно отметить, что в ряде случаев для эффективной работы выделенной полосы необходим контроль за соблюдением правил, чтобы предотвратить незаконный въезд личного транспорта, что требует дополнительных ресурсов.

Также одним из эффективных методов уменьшения задержек МТС в мире является *система приоритета маршрутного транспорта на светофорах (Traffic Signal Priority)*.

Суть этого метода заключается в предоставлении приоритетного проезда маршрутных пассажирских транспортных средств через регулируемые перекрёстки, что позволяет уменьшить время в пути, повысить регулярность движения и сделать маршрутный пассажирский транспорт более привлекательным для пассажиров [2, 5-6].

Также развиваются системы скоростного пассажирского транспорта, которые обеспечивают высокую скорость, надёжность и большую провозную способность по сравнению с обычными маршрутами из-за выделения отдельных путей следования и специального обустройства подходов и ожидания пассажиров прибытия МТС [2, 7].

Предпосылки для моделирования

Выбран объект исследования, который находится на одной из самых загруженных магистралей улично-дорожной сети крупнейшего города нашей страны – Минска. По проспекту Независимости проходит значительное количество маршрутов пассажирского транспорта, что подчёркивает его важность для пассажирских перевозок. В связи с этим эффективность движения маршрутного пассажирского транспорта на данном проспекте напрямую влияет на качество транспортного обслуживания жителей города.

В частности, особенно остро проблема блокировки движения МТС наблюдается на участке улично-дорожной сети в районе пересечения проспекта Независимости, проспекта Машерова и улицы Козлова (рис. 4). Здесь большое количество транспортных средств вынуждено временно занимать выделенную полосу для маршрутного транспорта при подготовке к повороту направо со стороны проспекта Независимости в сторону проспекта Машерова. При этом, даже имея разрешающий сигнал светофора, они часто вынуждены ожидать завершения движения пешеходов, пересекающих их траекторию. Кроме того, такие автомобили имеют право перестраиваться на выделенную полосу, если она отделена прерывистой линией, что создаёт дополнительные сложности и приводит к регулярным задержкам маршрутного транспорта.

В часы пик особенно снижается эффективность работы выделенных полос, ухудшая общую регулярность движения общественного транспорта. Кроме того, эффективность функционирования этих полос значительно снижается из-за недостаточного контроля за соблюдением правил.

Часто выделенная полоса оказывается занята не только маршрутным транспортом, но и легковыми автомобилями, в том числе такси, которые не относятся к маршрутным транспортным средствам и не имеют права пользоваться выделенной полосой, что дополнительно усугубляет ситуацию.

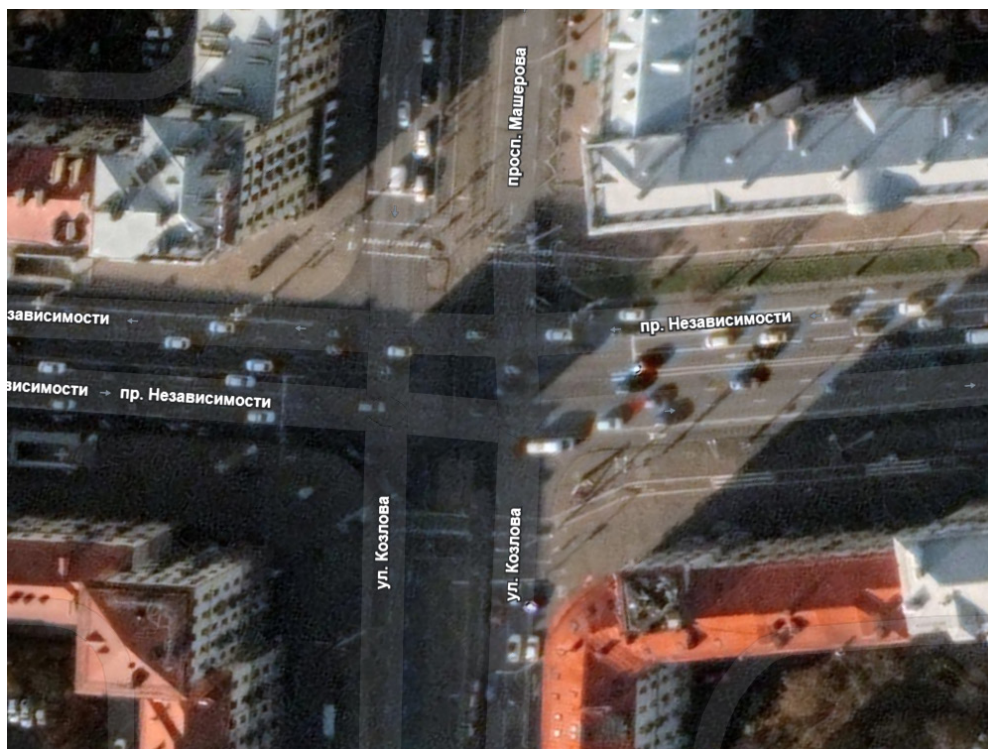


Рисунок 4. Схема исследуемого поворота транспортных средств с проспекта Независимости в сторону проспекта Машерова

Вследствие этих факторов маршрутные транспортные средства, которые должны иметь преимущество на выделенной полосе, вынуждены снижать скорость, простаивать в заторах или перестраиваться в соседние полосы, чтобы продолжить движение. Это в свою очередь нивелирует основное преимущество выделенной полосы — сокращение времени в пути и повышение надежности расписания маршрутного пассажирского транспорта. Кроме того, подобные ситуации создают дополнительный стресс для пассажиров, ухудшают общую транспортную ситуацию на перекрестке и снижают уровень комфорта при использовании маршрутных пассажирских транспортных средств.

Таким образом, рассматриваемый участок улично-дорожной сети является ярким примером сложной транспортной проблемы, характерной для многих крупных городов, где даже при наличии современной инфраструктуры и выделенных полос для маршрутного пассажирского транспорта

возникают значительные трудности с обеспечением беспрепятственного движения.

Выполнены исследования режимов светофорного регулирования, геометрических параметров и дорожных условий, а также замеры интенсивности транспортных и пешеходных потоков на исследуемом объекте. Полученные значения обработаны с помощью программного обеспечения New Traffic Intensity [8] и представлены в виде картограммы интенсивности движения (рис. 5).

Исследования проводились по методике БНТУ [9]. Также была получена информация о расписании движения маршрутного пассажирского транспорта. Согласно ей, частота прибытия МТС на объект исследования составляет 5 минут. Помимо того, были дополнительно проведены замеры среднепутевой скорости движения транспортных средств на участке: регулируемый пешеходный переход около домов № 46 и № 47 пр-та Независимости — пересечение пр-та Независимости, пр-та Машерова, улицы Козлова (рис. 6).

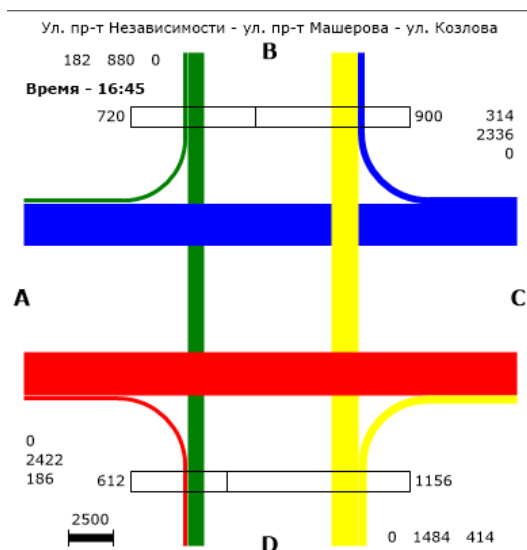


Рисунок 5. Картограмма интенсивности движения на пересечении исследуемого объекта, ед/ч и пеш/ч

Необходимо отметить, что для измерений скоростей на данном исследуемом объекте учитывались только транспортные средства, которые начинали движение после полной остановки на стоп-линии регулируемого пешеходного перехода около домов № 46 и № 47 проспекта Независимости.

Среднепутевая скорость потока из МТС и остальных ТС по направлению к перекрёстку измерялась в целевой период времени (вторник) (фрагмент – рис. 7).

По результатам измерений было получено значение коэффициента безостановочного проезда, который оказался равным 0,36. Это означает, что лишь небольшая часть всех транспортных средств движется без остановок, тогда как остальная их часть сталкивается с необходимостью замедления или полной остановки в связи с включением красного сигнала светофора на исследуемом перекрёстке.

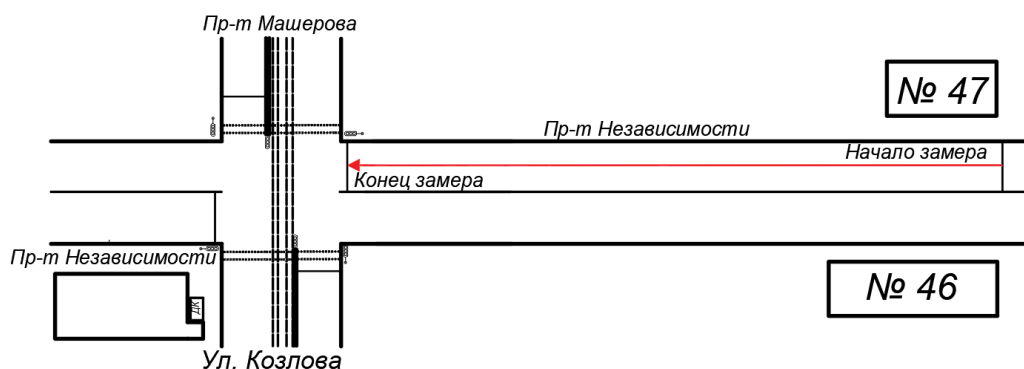


Рисунок 6. Схема участка для проведения замера среднепутевых скоростей

$\eta = 0.36$

$\eta = \{50.86, 37.5\}$

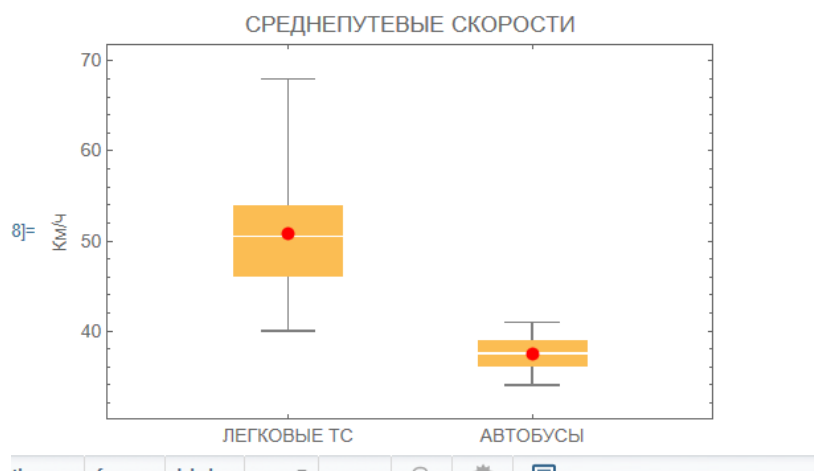


Рисунок 7. Бокс-диаграмма среднепутевых скоростей

Разработка вариантов гибкого управления на перекрестке

Общий принцип модели. базируется на том, что водитель маршрутного транспортного средства, заметив перед собой очередь транспортных средств, выполняющих правый поворот, может подать запрос на обслуживание дорожному контроллеру, что в свою очередь активирует диаграмму светофорного регулирования, обеспечивающую остановку транзитного потока по второй полосе и беспрепятственный пропуск маршрутного пассажирского транспортного средства. В простейшем (первом варианте) это выглядит, как указано на рисунках 8 и 9.

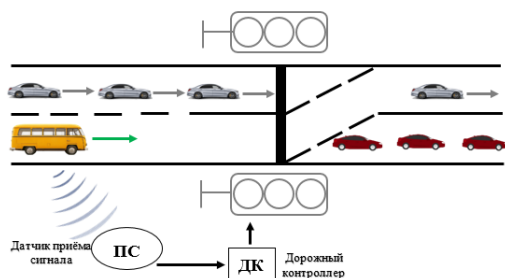


Рисунок 8. Запрос на обслуживание из салона маршрутного пассажирского транспортного средства

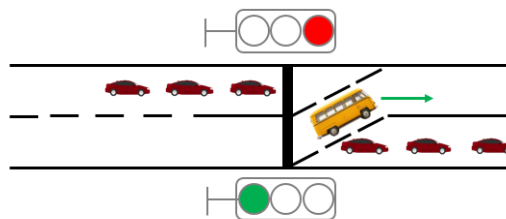


Рисунок 9. Проезд маршрутного пассажирского транспортного средства после активации цикла диаграммы светофорного регулирования

После того как МТС завершают проезд через регулируемую зону, по окончании одного активного цикла регулирования, светофоры возвращаются к выключенному состоянию. Алгоритм работы можно представить в следующем виде (рис. 10).

Соответствующая диаграмма одного активного цикла представлена на рисунке 11.

Данный алгоритм может быть реализован на дорожных контроллерах типа «СИДК», которые поддерживают жёлтый мигающий сигнал в программах и обеспечивают организацию гибкого регулирования движения. Для этого достаточно организации тактов и переходов между ними согласно рисункам 12 и 13.

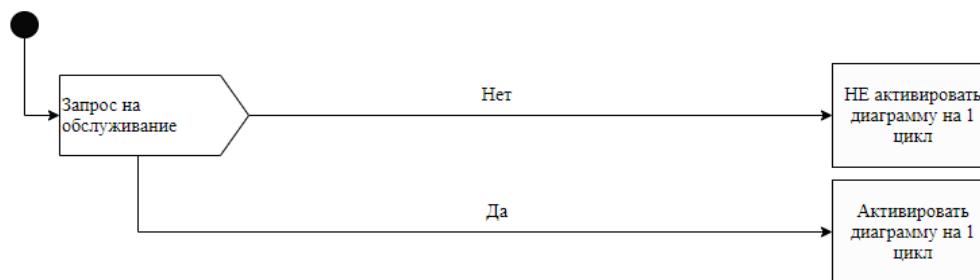


Рисунок 10. Алгоритм работы первого варианта реализации

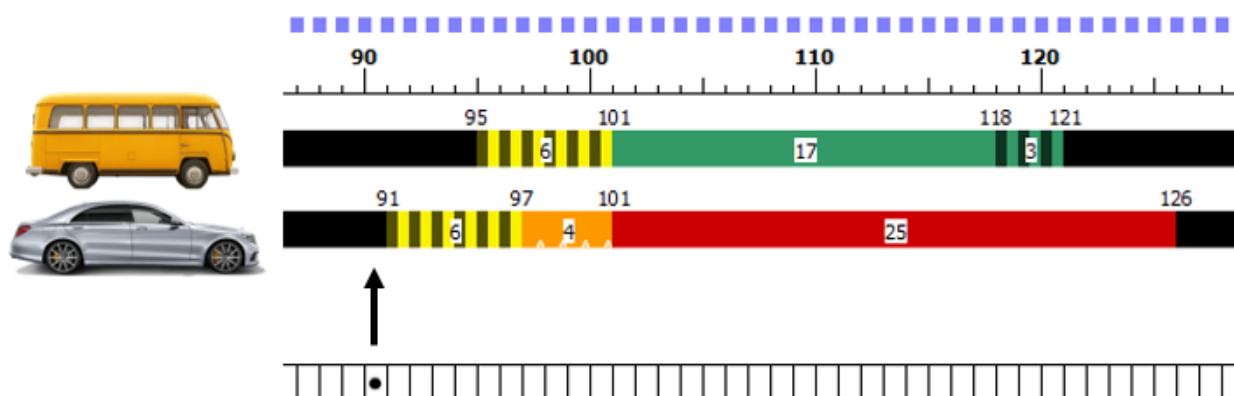


Рисунок 11. Диаграмма светофорного регулирования (границы активного цикла выделены синим цветом)

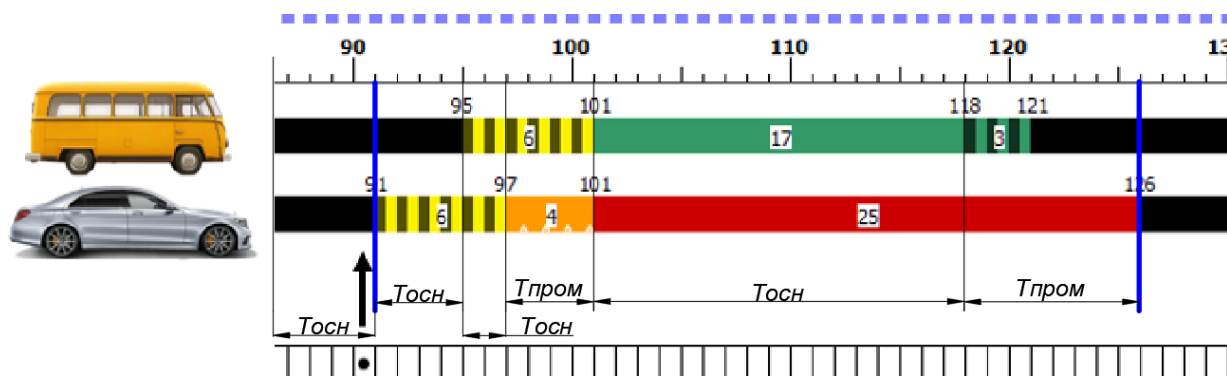


Рисунок 12. Потактовое представление диаграммы светофорного регулирования на один цикл

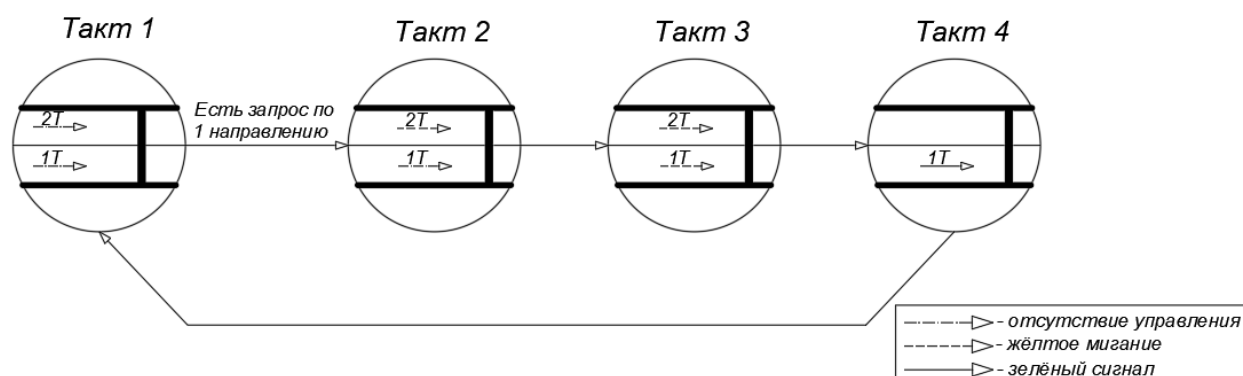


Рисунок 13. Потактовое переключение

Однако в рассмотренном варианте есть следующий недостаток: проблема с выбором длительности зелёного сигнала. Например, бывает так, что после включения светофора на зелёный сигнал проезжает всего одна подвижная единица МТС, а время зелёного сигнала ещё не закончилось, поскольку предусматривало проезд двух – то есть присутствует неиспользуемое время, которое можно сократить.

Поэтому предложен второй вариант реализации решения.

Реализация второго варианта отличается следующим: если, после того как был получен первый запрос на обслуживание, например, от первого МТС, в течение определённого времени не поступает никаких новых запросов, скажем, от второго или третьего МТС, то в контроллер поступает информация о наличии разрыва в потоке¹. В ответ дорожный контроллер автоматически сокращает длительность зелёного сигнала до минимума (рис. 14).

Для реализации такого решения в проекте предполагается использование (помимо датчика запроса на обслуживание) дополнительного

логического датчика² (датчик разрыва в потоке), в варианте, который фиксирует мгновенное состояние разрыва (то есть, не запоминает единожды уже обнаруженный разрыв). В качестве порогового значения для обнаружения разрыва в потоке предлагается установить 5 сек, поскольку этого времени достаточно, чтобы МТС успело доехать от расположенного поблизости остановочного пункта до регулируемой зоны.

Таким образом, алгоритм работы можно представить в следующем виде (рис. 15).

Условие «Зелёный горит ≥ 5 секунд» используется, чтобы предоставить второму МТС возможность подать запрос на продолжение зелёного сигнала, когда первый МТС ещё не завершило проезд.

Соответствующая диаграмма одного цикла представлена на рисунке 16.

Данный алгоритм, также, как и в первом случае, может быть реализован на дорожных контроллерах типа «СИДК», которые поддерживают жёлтый мигающий сигнал в программах и обеспечивают организацию гибкого регулирования движения. Для этого достаточно организации тактов и переходов между ними в соответствии с рисунками 17 и 18.

¹Разрыв в потоке – это ситуация, когда после проезда первого автомобиля следующее транспортное средство появляется с временным зазором (Gap), превышающим установленный порог, заданный для данного датчика.

² Логический датчик — абстрактный датчик, обрабатывающий данные с физического детектора

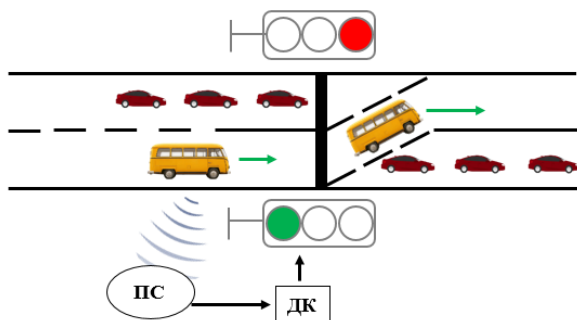


Рисунок 14. Управление в ситуации, когда есть 2 запроса на обслуживание (без сокращения времени)

Разработана схема размещения светофоров и основных элементов дорожной инфраструк-

туры, которая отражает планируемую организацию движения на рассматриваемом участке (рис. 19).

Для обеспечения эффективного и безопасного регулирования движения на рассматриваемом перекрёстке необходимо правильно спроектировать расположение светофорных объектов и сопутствующих элементов приёма и передачи запроса от водителя к дорожному контроллеру. Ниже приведено подробное описание размещения основных компонентов системы, включая установку стоп-линии, светофорных опор и дополнительных устройств, обеспечивающих максимальную видимость и информативность сигналов для водителей.

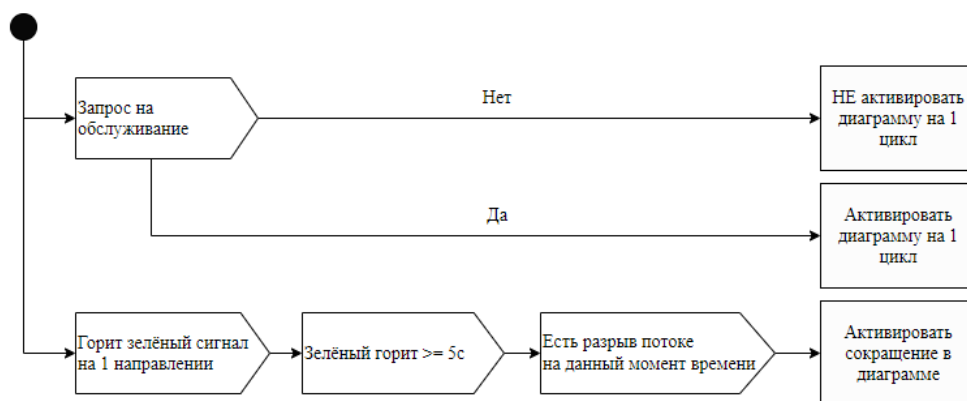


Рисунок 15. Алгоритм работы второго варианта реализации

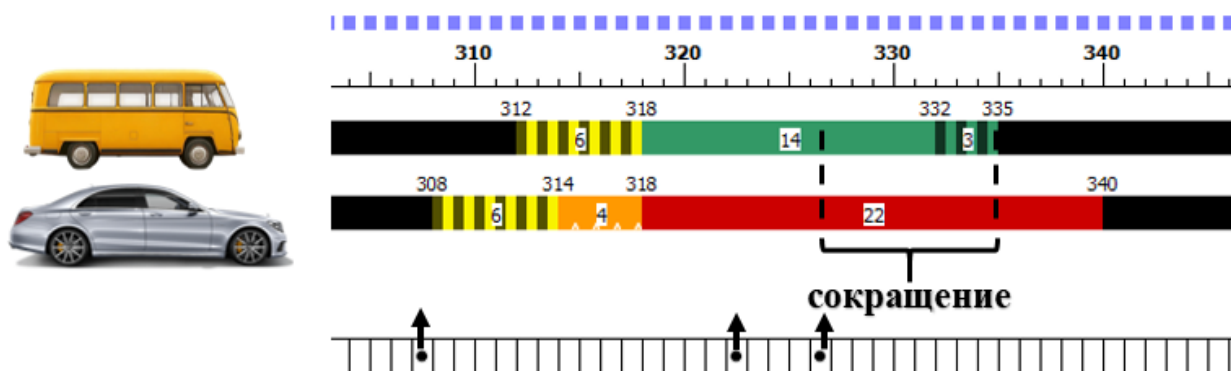


Рисунок 16. Диаграмма светофорного регулирования при нескольких запросах на обслуживание

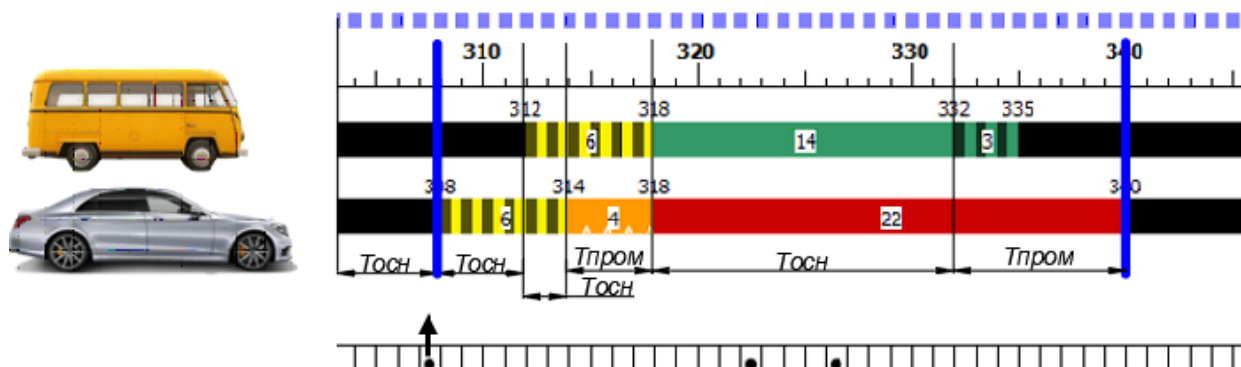


Рисунок 17. Потактовое представление диаграммы светофорного регулирования на один цикл

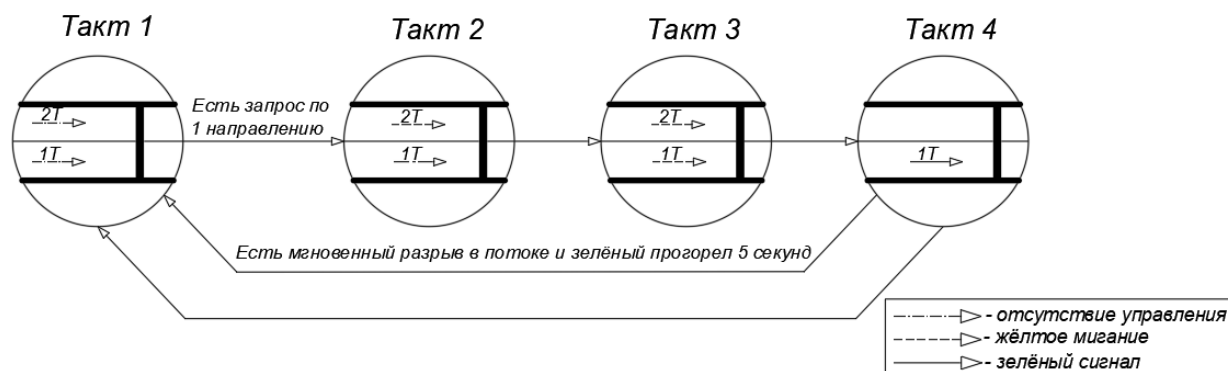


Рисунок 18. Потактовое переключение

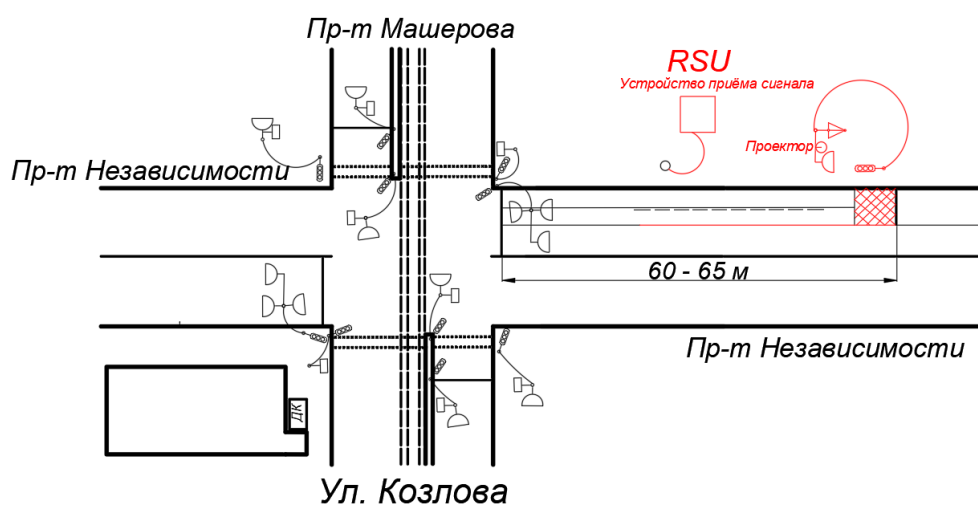


Рисунок 19. Схема предполагаемого размещения светофоров и основных элементов дорожной инфраструктуры

Имеет смысл нанести стоп-линию за 60–65 метров до перекрёстка (по результатам замеров максимальной очереди). Справа, на тротуаре или газоне, на расстоянии 10 метров от стоп-линии устанавливается гранёная светофорная опора. На этой опоре справа размещается светофор для выделенной полосы Т.8. Для второй полосы сверху на опоре устанавливается светофор Т.1. Вместе со светофором Т.1 монтируется экран с чёрным фоном и белой каймой, а под ним размещается знак 7.14, указывающий, что действие сигнала распространяется только на полосу, находящуюся под знаком.

Кроме того, на светофорной опоре устанавливается проектор, дублирующий сигналы обоих светофоров, чтобы водители других транспортных средств с большей вероятностью могли их заметить. Для светофора Т.8 используются маски в виде стрелки «Движение разрешено» и символа МТС.

Перед стоп-линией наносится разметка 1.37 и устанавливается экран со светоотражающей краской для проецирования сигналов с проектора (рис. 20).

Также в 20 метрах от самого перекрёстка на опоре освещения будет установлен коммуникационный модуль TEDIX системы LTE-V2X для передачи запроса от водителя к дорожному контроллеру.



Рисунок 20. Визуальное представление решения на исследуемом перекрестке

Для организации передачи запроса от водителя маршрутного пассажирского транспортного средства к дорожному контроллеру наиболее перспективным представляется использование технологии LTE V2X.

В качестве технической реализации технологии LTE-V2X можно использовать оборудование, в частности компании Fort Telecom, выпускаемое под брендом TEDIX.

Архитектура этой системы строится на следующих ключевых компонентах [10-11]:

1. Бортовой модуль LTE-V2X (OBU – On Board Unit (TEDIX)) — устройство, устанавливаемое в салоне МТС, служит связующим звеном между водителем и дорожной инфраструктурой. Оно оснащено цифровыми входами для подключения кнопки ручного управления. Также есть подключение к TEDIX-Connect — мобильное приложение на базе операционной системы Android для приёма информации от придорожного коммуникационного модуля (рис. 21 и 22);

2. Придорожный коммуникационный модуль (RSU – Road Site Unit (TEDIX)) – придорожный терминал, принимающий запросы от OBU и передающий их на светодорный контроллер, например, СИДК. (рис. 23);

3. Сервер управления ИТС – централизованная платформа, обрабатывающая данные со всех перекрёстков и координирующая их работу для оптимизации движения на масштабах города. Однако стоит отметить, что технология обеспечивает прямую и надёжную связь между маршрутным транспортным средством и дорожной инфраструктурой без необходимости постоянного подключения к центральному серверу.



Рисунок 21. Бортовой модуль LTE-V2X (TEDIX)



Рисунок 22. Мобильное приложение на базе операционной системы Android



Рисунок 23. Придорожный коммуникационный модуль RSU

В данном разделе были рассмотрены основные компоненты проектного решения, включая варианты его реализации и алгоритмы функционирования. Представленные технические решения и алгоритмы направлены на повышение безопасности и оптимизацию движения маршрутного пассажирского транспорта за счёт минимизации блокировок.

Для оценки результативности и эффективности разработанных алгоритмов использовался программный комплекс SUMO (Simulation of Urban MObility). Этот инструмент позволяет проводить моделирование и симуляцию городских транспортных потоков, что является важным для анализа и оптимизации дорожного движения.

Далее была выполнена калибровка модели, основанная на реальных данных о движении потока транспортных средств. Калибровка включала настройку параметров модели для обеспечения максимального соответствия симуляции реальным условиям дорожного движения. SUMO по умолчанию использует Крауссову модель для симуляции движения транспортных средств. Для достижения реалистичного поведения автомобилей в симуляции, параметры этой модели были изменены и адаптированы.

Процесс калибровки включал итеративные изменения параметров и последующее тестирование модели, чтобы достичь оптимального соответствия между симулированными и реальными данными. Для этого использовались данные о дорожном движении, собранные на исследуемом объекте, что позволило создать высоко реалистичную модель дорожного потока.

После завершения калибровки и настройки параметров модели, были проведены симуляции, которые включали два ключевых этапа: проведение имитационного эксперимента с существующими

настройками светофорного объекта и эксперимента с предлагаемыми мерами уменьшения блокировок движения маршрутных транспортных средств.

Симуляции, по которым производилась оценка эффективности, моделировали полтора часа для каждого рассматриваемого варианта. Симуляции были проведены в 21 прогон.

В качестве показателя результативности используются показатели общих задержек транспортных средств на исследуемом перекрёстке [12], которые были рассчитаны с помощью SUMO. Система рассчитала задержки для всех

транспортных средств: для МТС, для транспортных средств, которые движутся в прямом направлении и для правоповоротных транспортных средств.

Также было проведено тестирование гипотез для пересекающихся бокс-диаграмм задержек, которое показало, что при предлагаемых вариантах 1 и 2 задержки легковых автомобилей статистически не отличаются от исходного варианта, в то время как для маршрутных пассажирских транспортных средств варианты 1 и 2 статистически-значимо отличны от исходных.

Результаты расчётов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Общие задержки транспортных средств (за полтора часа)

Общие задержки, авт*ч	Существующие	Предлагаемые Вариант-1	Предлагаемые Вариант-2
МТС (автобусы)	0,63	0,47	0,49
Прямо движущиеся ТС	26,79	25,69	25,42
Правоповоротные ТС	12,99	11,75	11,8

Сравнительные бокс-диаграммы задержек ТС при различных вариантах представлены на рисунках 24-26.

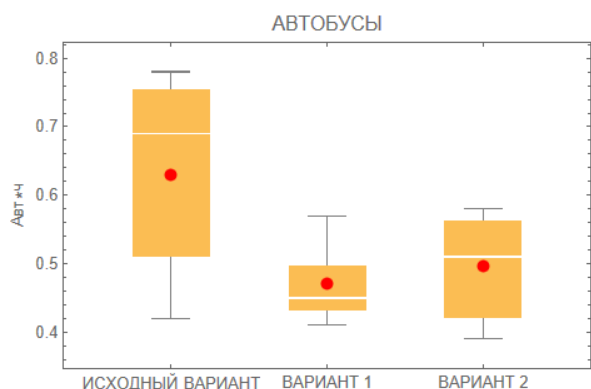


Рисунок 24. Сравнительная бокс-диаграмма общих задержек МТС

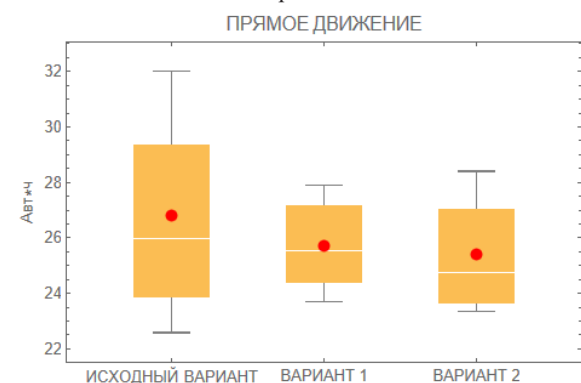


Рисунок 25. Сравнительная бокс-диаграмма общих задержек транспортных средств, движущихся в прямом направлении

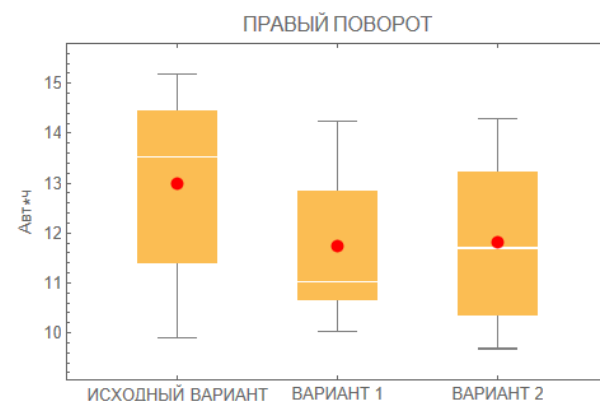


Рисунок 26. Сравнительная бокс-диаграмма общих задержек транспортных средств, движущихся направо

Таким образом, на основании приведённых данных анализа бокс-диаграмм можно сделать вывод, что введение первого варианта проектного решения является достаточно результативным, и его использование приведёт к снижению задержек для маршрутных транспортных средств на 25,4 %.

Введение второго варианта проектного решения приведёт к снижению задержек для маршрутных транспортных средств на 21,3 %. Для прямо движущихся и правоповоротных транспортных средств ситуация не изменилась. По методике БНТУ определены годовые потери от задержек (представлены в таблице 2).

Таблица 2. Годовые потери от задержек транспортных средств

Потери от общих задержек, у.е./год	Существующие	Предлагаемые Вариант-1	Предлагаемые Вариант-2
МТС (автобусы)	81497	60799	63386
Прямо движущиеся ТС	247540	237376	234881
Правоповоротные ТС	120028	108570	109032

Заключение

В результате исследований были разработаны алгоритмы адаптивного управления транспортными потоками в двух вариантах: для активации диаграммы светофорного регулирования, где неиспользуемое время не сокращается (вариант 1), и для активации диаграммы светофорного регулирования на один цикл, где неиспользуемое время сокращается до минимума в случае отсутствия дополнительных МТС (вариант 2).

С помощью имитационного моделирования в SUMO выполнена оценка показателей эффективности, в результате которой установлено:

– общие часовые задержки для маршрутных транспортных средств при введении первого варианта проектного решения сократились на 25,4 %, а введение второго варианта проектного решения способствовало снижению задержек на 21,3 %;

– потери от задержек МТС снижаются на 20698 у.е./год;

– срок окупаемости капиталовложений – 80 дней;

– годовой экономический эффект составит 19167 у.е./год;

– при этом на 1 у.е. капитальных вложений потери от задержек снижаются на 4,46 у.е./год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский, Д. В. Бионическое развитие транспортных систем городов / Д. В. Капский, С. В. Богданович // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сборник научных статей. – Минск, 2022. – Вып. 4. – С. 91–97.
2. Устойчивая городская мобильность: теория и практика развития / А. О. Лобашов, Е. Н. Кот, Д. В. Капский [и др.]. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 236 с.
3. Капский, Д. В. Методология повышения качества дорожного движения / Д. В. Капский / Минск : БНТУ, 2018. – 372 с.
4. Капский, Д. В. Повышение эффективности применения информации при организации перевозок пассажиров в городах / Д. В. Капский, С. С. Семченков, О. Н. Ларин // Наука и техника. – 2022. – № 4. – С. 323–330. – DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-4-323-330
5. Transit signal priority // TSMO at WSDOT. – URL: <https://tsmowa.org/category/intelligent-transportation-systems/transit-signal-priority> (дата обращения: 04.06.2025).
6. Signal Priority // Federal Transit Administration. – URL: <https://www.transit.dot.gov/research-innovation/signal-priority> (дата обращения: 04.06.2025).
7. Bus rapid transit. Planning guide. – New York, 2007. – 825 p.
8. RTF-Road traffic flows : свидетельство о регистрации компьютерной программы № 222 / Д. В. Капский, Д.В. Мозалевский, М.К. Мирошник, А.В. Коржова, В.Н. Кузьменко, А.С. Полховская, Е.Н. Костюкович. – № С20100112 ; заявл. 07.09.2010 ; опубл. 17.09.2010 / Нац. центр интеллектуальной собственности.
9. Технические средства организации дорожного движения / Е. Н. Кот, Д. В. Капский, А. В. Коржова. – Минск : БНТУ, 2016. – 239 с.
10. TEDIX – оборудование для V2X // Fort Telecom. – URL: <https://tedix.fort-telecom.ru/> (дата обращения: 04.06.2025).
11. Vehicle-to-Everything (V2X) 5G в эволюции автомобилей // TAdviser. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Vehicle-to-Everything_\(V2X\)_5G_в_эволюции_автомобилей](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Vehicle-to-Everything_(V2X)_5G_в_эволюции_автомобилей) (дата обращения: 04.06.2025).
12. Врубел, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубел, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 239 с.

REFERENCES

1. Kapski, D. V. Bionic development of urban transport systems / D. V. Kapski, S. V. Bogdanovich // Transport and transport systems: design, operation, technologies : collection of scientific articles. – Minsk, 2022. – Vol. 4. – P. 28–34 (in Russian).

2. Sustainable urban mobility : theory and practice of development / A. O. Lobashov, E. N. Kot, D. V. Kapski [et al.]. – Vologda : Infra-Inzhenerija, 2023. – 236 p. (in Russian).
3. **Kapski, D. V.** Methodology for improving the quality of road traffic / D. V. Kapski / Minsk : BNTU, 2018. – 372 p. (in Russian).
4. **Kapski, D. V.** Improving the Efficiency of Information Application in the Organization of Passenger Transportation in Cities. / D. V. Kapski, S. S. Semchenkov, O. N. Larin // Science & Technique. – 2022. – Vol. 21, № 4. – P. 323-330. – DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-4-323-330 (in Russian).
5. Transit signal priority // TSMO at WSDOT. – URL: <https://tsmowa.org/category/intelligent-transportation-systems/transit-signal-priority> (date of access: 04.06.2025).
6. Signal Priority // Federal Transit Administration. – URL: <https://www.transit.dot.gov/research-innovation/signal-priority> (date of access: 04.06.2025).
7. Bus rapid transit. Planning guide. – New York, 2007. – 825 p.
8. RTF-Road traffic flows : svidetel'stvo o registracii komp'juternoj programmy № 222 / D.V. Kapski, D.V. Mozalevskij, M.K. Miroshnik, A.V. Korzhova, V.N. Kuz'menko, A.S. Polhovskaja, E.N. Kostjukovich. – № S20100112 ; zajavl. 07.09.2010 ; opubl. 17.09.2010 / Nac. centr intelektual'noj sobstvennosti. (in Russian).
9. **Kot, E. N.** Technical means of road traffic organisation / E. N. Kot, D. V. Kapski, A. V. Korzhova. – Minsk : BNTU, 2016. – 239 p. (in Russian).
10. TEDIX – equipment for V2X // Fort Telecom. – URL: <https://tedix.fort-telecom.ru/> (date of access: 04.06.2025).
11. Vehicle-to-Everything (V2X) 5G in the evolution of automobiles // TAdviser. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Vehicle-to-Everything_\(V2X\)_5G_в_эволюции_автомобилей](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Vehicle-to-Everything_(V2X)_5G_в_эволюции_автомобилей) (date of access: 04.06.2025).
12. **Vrubel, Ju. A.** Determination of traffic losses / Ju. A. Vrubel, D. V. Kapski, E. N. Kot. – Minsk : BNTU, 2006. – 240 p. (in Russian).

LIU YUWEI, SARAZHINSKY D.S., KAPSKI D.V.

DEVELOPMENT OF A FLEXIBLE TRAFFIC FLOW MANAGEMENT OPTION FOR ORGANIZING NON-STOP TRAFFIC OF PUBLIC TRANSPORT IN THE AREA OF A CONTROLLED INTERSECTION

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. *The article provides an analysis of existing methods for reducing the likelihood of blocking the movement of public transport vehicles at controlled intersections. On the section of the street and road network in the area of the intersection of Nezavisimosti Avenue – Masharov Avenue – Kozlov Street, flexible control algorithms have been developed to reduce blockages of the movement of route passenger vehicles by other vehicles based on intelligent transport systems, and solutions have been proposed for the use of modern means of traffic light control. Using simulation micro-modeling, an assessment of the effectiveness of the proposed solutions and their efficiency was performed.*

Keywords: *traffic flow, controlled intersection, route vehicle, flexible regulation, control algorithm*



Лю Юйвэй, Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь. Кафедра «Транспортные системы и технологии», аспирантка.

Liu Yuwei, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus. Department of Transport Systems and Technologies, postgraduate student.



Саражинский Денис Сергеевич, Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь. Кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры «Транспортные системы и технологии».

Denis S. Sarazhinsky, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus. PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Technologies.



Капский Денис Васильевич, Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, заместитель председателя ВАК, доктор техн. наук, профессор. Профессор кафедры «Транспортные системы и технологии», Белорусский национальный технический университет.

Denis V. Kapski, Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Vice-chairman HAC, Doctor of Engineering Science, Professor. Professor of the Department of Transport Systems and Technologies, Belarusian National Technical University.

E-mail: d.kapsky@bntu.by, d.kapsky@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9300-3857>