

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ГИБКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ МТС НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ

*ЛЮ ЮЙВЭЙ, канд. физ.-мат. наук, доц. Д.С. САРАЖИНСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ
(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск;
Белорусский национальный технический университет, Минск;
Академия управления при Президенте Республики Беларусь, Минск)*

Выполнен анализ существующих методов и технологий, направленных на уменьшение блокировок движения маршрутных пассажирских транспортных средств на регулируемых перекрестках. Разработаны варианты на базе интеллектуальных транспортных систем, гибких алгоритмов управления дорожным движением и современных средств управления светофорным регулированием для уменьшения блокировок маршрутных транспортных средств. Путем имитационного микромоделирования оценена результативность предложенных решений, а также их эффективность.

Ключевые слова: маршрутные транспортные средства, регулируемый перекресток, гибкое регулирование, алгоритмы, управление.

Введение. Главной целью для всех существующих подходов и методов является обеспечение эксплуатационной скорости [1], а также стабильности работы маршрутного пассажирского транспорта, т.е. точное выполнение установленного расписания движения [2]. Наиболее распространенные из них представлены на рисунке 1, среди которых выделенные специальные полосы для движения маршрутного транспорта, смещение выделенной полосы, приоритет маршрутного пассажирского транспорта на регулируемых перекрестках (TSP – Transit Signal Priority), скоростные автобусные линии (BRT – Bus Rapid Transit) и пр.^{1,2,3,4,5,6,7}.

В г. Минске внедряются аналогичные методы организации движения маршрутного пассажирского транспорта, направленные на повышение его эффективности и уменьшение блокировок на дорогах: метод выделения специальных полос для маршрутных транспортных средств, например, на проспекте Независимости; метод смещения выделенной полосы во вторую полосу с образованием кармана для правоповоротных транспортных средств, например, на пересечении улицы Притыцкого – улицы Лещинского – улицы Якубовского. Кроме того, стоит отметить, что для эффективной работы выделенной полосы необходим контроль за соблюдением правил для предотвращения незаконного въезда личного транспорта. Поэтому в Минске используется метод контроля выделенных полос с помощью камер, фиксирующих нарушение правил проезда по полосам, в т.ч. незаконное движение личного транспорта по выделенным полосам для маршрутного транспорта.

Основная часть. Установлены причины блокировки маршрутных транспортных средств (МТС) (рисунок 2).

Основная идея предлагаемых подходов заключается в организации регулируемой зоны, расположенной на определенном удалении от исследуемого перекрестка. Такая зона позволяет эффективно управлять движением, создавая при необходимости возможность останавливать транспортный поток, движущийся по второй полосе. Это обеспечивает безопасное и своевременное перестроение маршрутных транспортных средств, следующих по выделенной полосе, во вторую полосу движения для того, чтобы избежать очереди из правоповоротных транспортных средств и вернуться обратно в выделенную полосу. В результате будут существенно снижаться блокировки маршрутных пассажирских транспортных средств.

¹ Transit Signal Priority [Электронный ресурс] // TSMO WA. – URL: <https://tsmowa.org/category/intelligent-transportation-systems/transit-signal-priority> (дата обращения: 04.06.2025).

² Signal Priority [Электронный ресурс] // Federal Transit Administration. – URL: <https://www.transit.dot.gov/research-innovation/signal-priority> (дата обращения: 04.06.2025).

³ Transit Signal Priority [Электронный ресурс] // RTD Denver. – URL: <https://www.rtd-denver.com/ru/about-rtd/projects/transit-signal-priority> (дата обращения: 04.06.2025).

⁴ Transit Signal Priority [Электронный ресурс] // WeGoTransit. – URL: <https://www.wegotransit.com/projects/transit-signal-priority/> (дата обращения: 04.06.2025).

⁵ Transit Signal Priority [Электронный ресурс] // Greater Portland METRO. – URL: <https://www.gpmetro.org/about-us/projects-initiatives/transit-signal-priority/> (дата обращения: 04.06.2025).

⁶ Transit Advantages and Signal Priority Working Group Report [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lrl.mn.gov/docs/2024/mandated/240348.pdf> (дата обращения: 04.06.2025).

⁷ The Effect of Transit Signal Priority on Bus Rapid Transit Headway Adherence [Электронный ресурс] // Findings. – URL: <https://findingspress.org/article/24499-the-effect-of-transit-signal-priority-on-bus-rapid-transit-headway-adherence> (дата обращения: 04.06.2025).

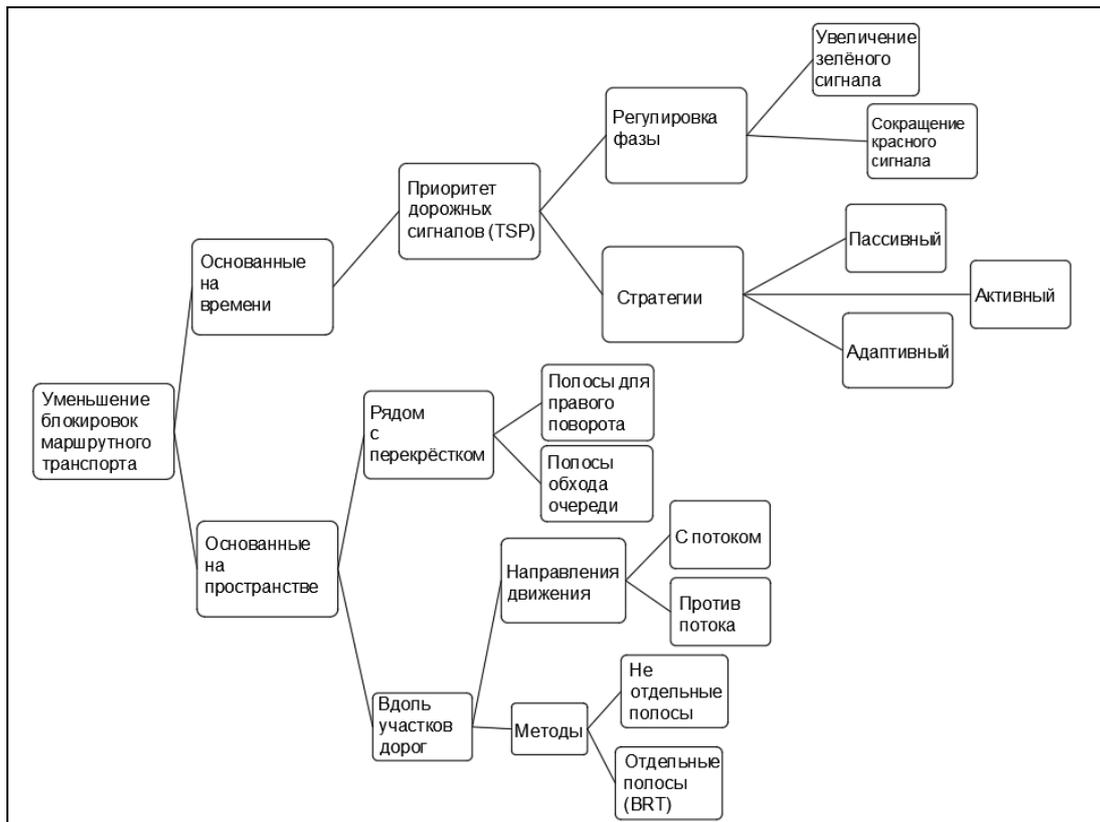


Рисунок 1. – Схема существующих методов уменьшения блокировок маршрутного пассажирского транспорта

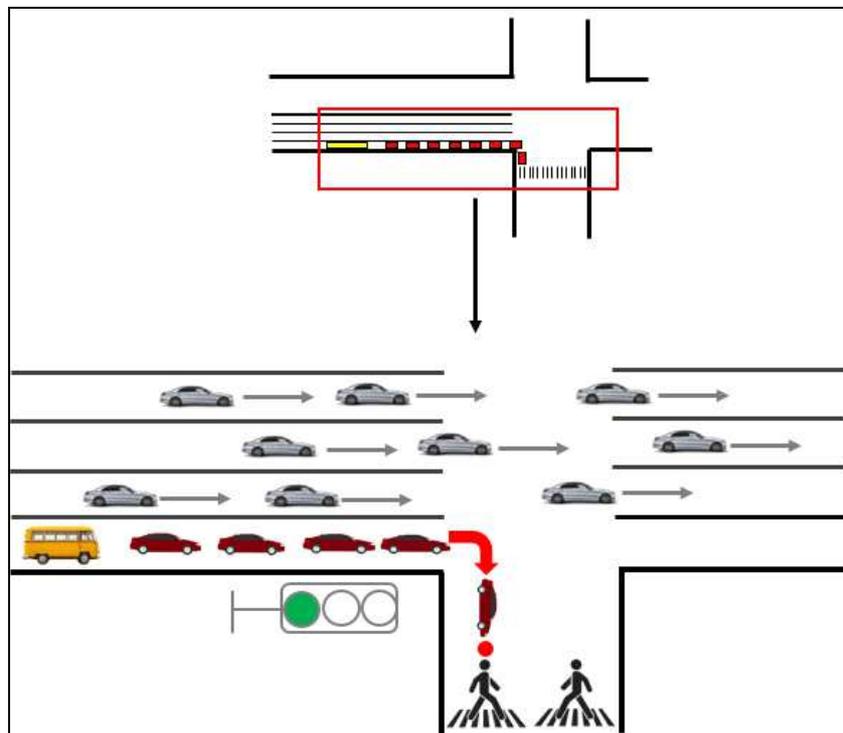


Рисунок 2. – Причина блокировки маршрутных пассажирских транспортных средств

Реализация обоих вариантов 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 показано на рисунках 3 и 4

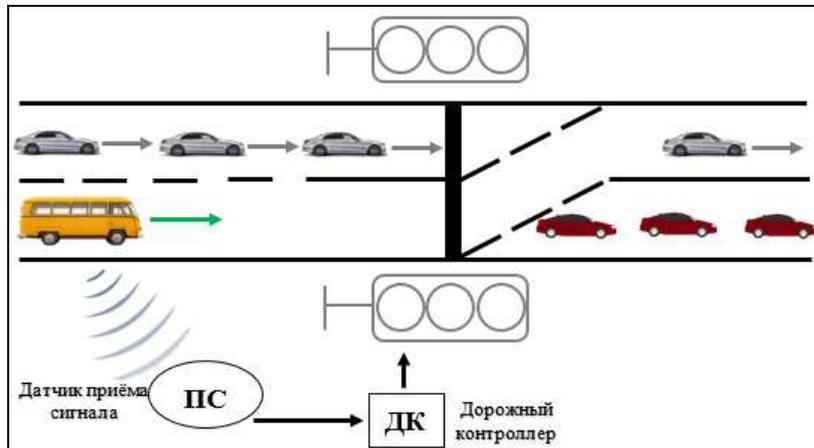


Рисунок 3. – Запрос на обслуживание из салона маршрутного пассажирского транспортного средства

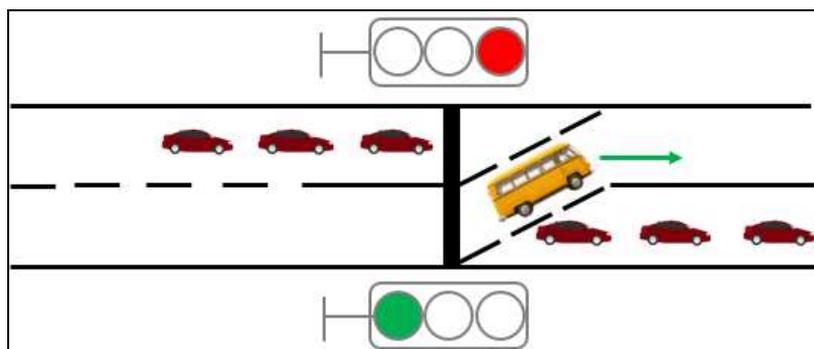


Рисунок 4. – Проезд маршрутного пассажирского транспортного средства после активации цикла диаграммы светофорного регулирования

После того как автобусы и троллейбусы завершают проезд через регулируемую зону, по окончании одного активного цикла регулирования, светофоры возвращаются к выключенному состоянию. Таким образом алгоритм работы можно представить в следующем виде – рисунок 5.

Соответствующая диаграмма одного активного цикла представлена на рисунке 6.

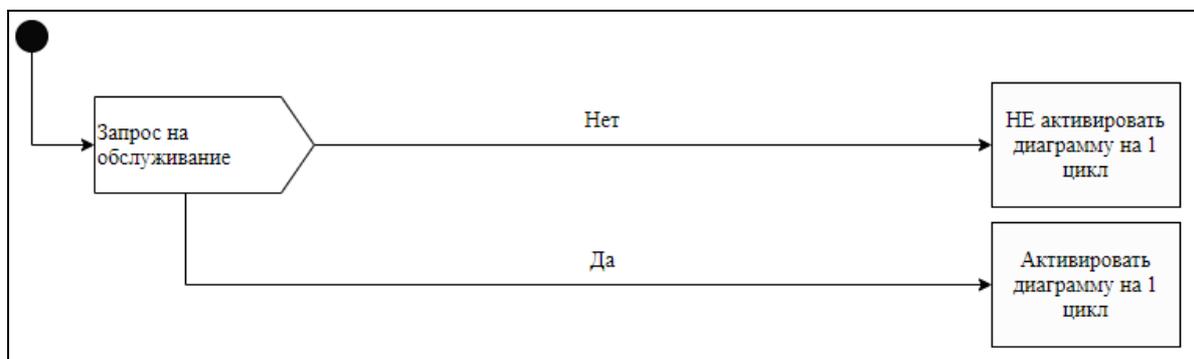


Рисунок 5. – Алгоритм работы первого варианта реализации

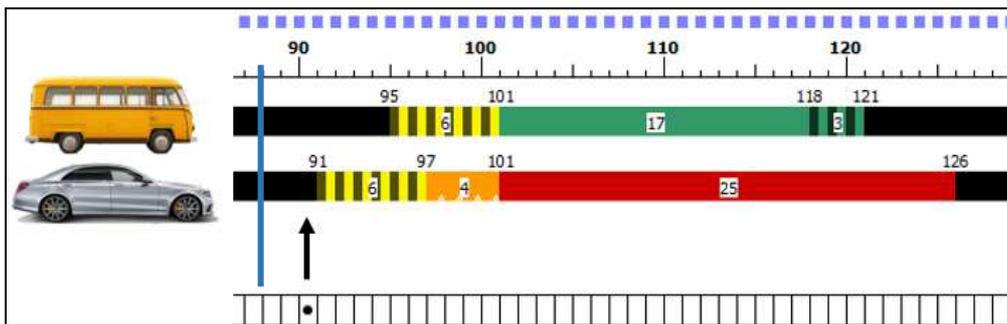


Рисунок 6. – Диаграмма светофорного регулирования (границы активного цикла выделены синим цветом)

Данный алгоритм может быть реализован на дорожных контроллерах типа «СИДК», которые поддерживают желтый мигающий сигнал в программах и обеспечивают организацию гибкого регулирования движения. Для этого достаточно организации тактов и переходов между ними согласно рисункам 7 и 8.

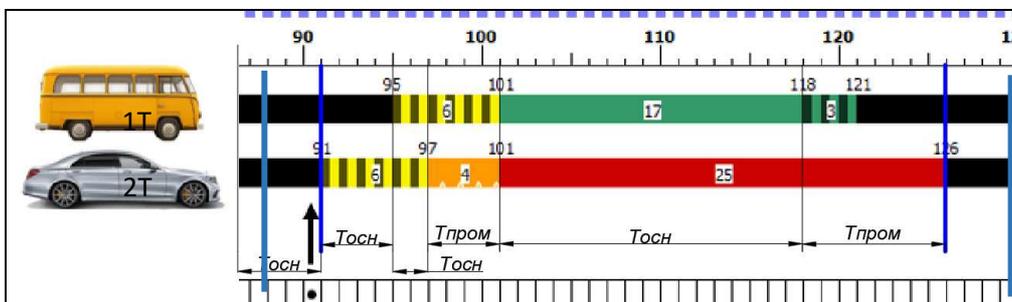


Рисунок 7. – Потактовое представление диаграммы светофорного регулирования на один цикл

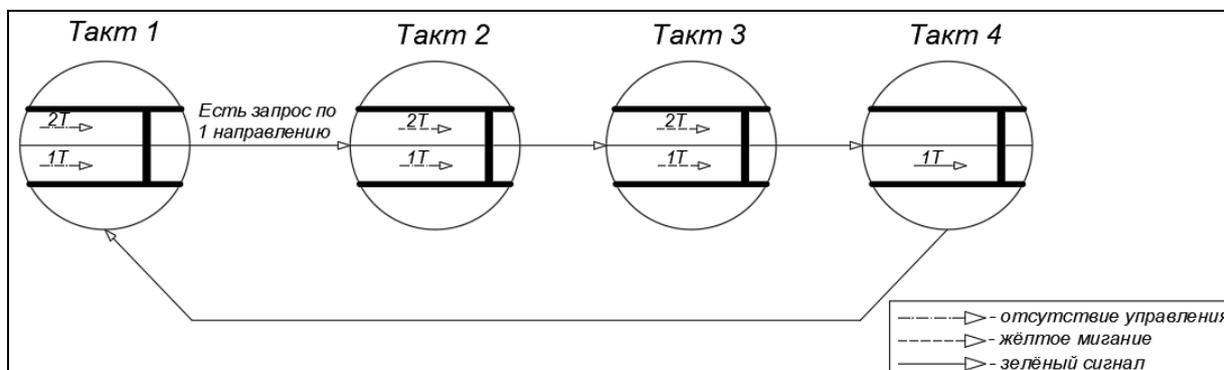


Рисунок 8. – Потактовое переключение

Но в рассмотренном варианте есть недостаток – проблема с выбором длительности зеленого сигнала. Например, после включения светофора на зеленый сигнал проезжает всего один автобус, а время зеленого сигнала еще не закончилось, поскольку предусматривало проезд двух, т.е. присутствует неиспользуемое время, которое можно сократить. Поэтому был рассмотрен второй вариант реализации проектного решения.

Реализация второго варианта практически схожа с первым вариантом реализации, представленным выше. Однако если после того, как был получен первый запрос на обслуживание, например, от первого автобуса, в течение определенного времени не поступает никаких новых запросов, скажем, от второго или третьего автобуса, то в контроллер поступает информация о наличии разрыва в потоке⁸. В ответ дорожный контроллер автоматически сокращает длительность зеленого сигнала до минимума (рисунок 9).

⁸ Разрыв в потоке – ситуация, когда после проезда первого автомобиля следующее транспортное средство появляется с временным зазором (Gap – временной зазор), превышающим установленный порог, заданный для данного датчика.

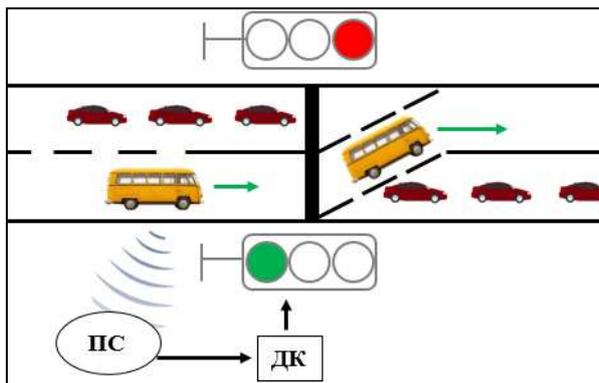


Рисунок 9. – Управление в ситуации, когда есть 2 запроса на обслуживание (без сокращения времени)

Для осуществления такого решения в проекте предполагается использование (помимо датчика запроса на обслуживание) дополнительного логического датчика⁹ – датчика разрыва в потоке, который фиксирует мгновенное состояние разрыва (т.е. не запоминает единожды уже обнаруженный разрыв). В качестве порогового значения для обнаружения разрыва в потоке предлагается установить 5 с, поскольку этого времени достаточно, чтобы автобус успел доехать от расположенного поблизости остановочного пункта до регулируемой зоны.

Таким образом, алгоритм работы можно представить в следующем виде (рисунок 10).

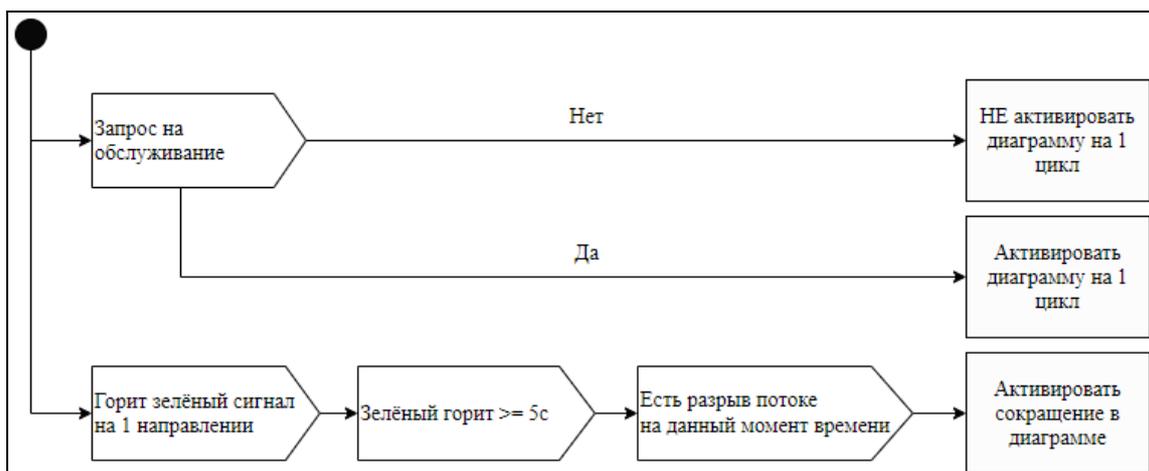


Рисунок 10. – Алгоритм работы второго варианта реализации

Условие «Зеленый горит >= 5 секунд» используется, чтобы предоставить второму автобусу возможность подать запрос на продолжение зеленого сигнала, когда первый автобус еще не завершил проезд.

Соответствующая диаграмма одного цикла представлена на рисунке 11.

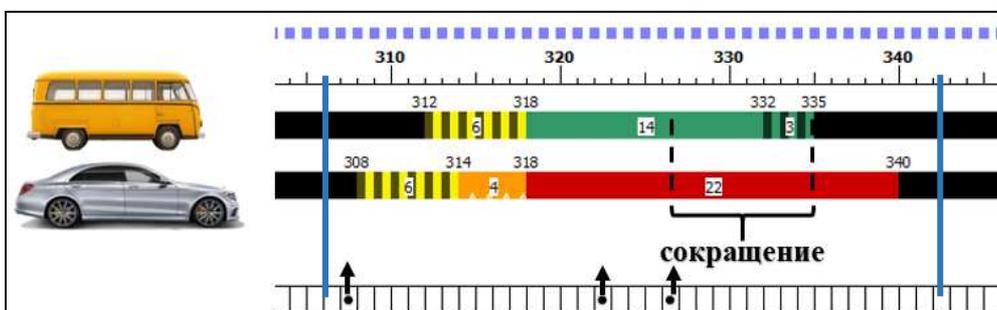


Рисунок 11. – Диаграмма светофорного регулирования при нескольких запросах на обслуживание

⁹ Логический датчик – абстрактный датчик, обрабатывающие данные с физического детектора.

Данный алгоритм, как и в первом случае, может быть принят на дорожных контроллерах типа «СИДК», которые поддерживают желтый мигающий сигнал в программах и обеспечивают организацию гибкого регулирования движения. Для этого достаточно выполнения тактов и переходов между ними в соответствии с рисунками 12 и 13.

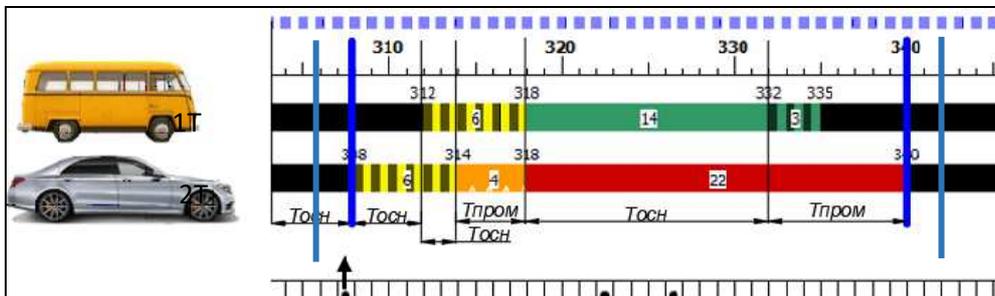


Рисунок 12. – Потактовое представление диаграммы светофорного регулирования на один цикл

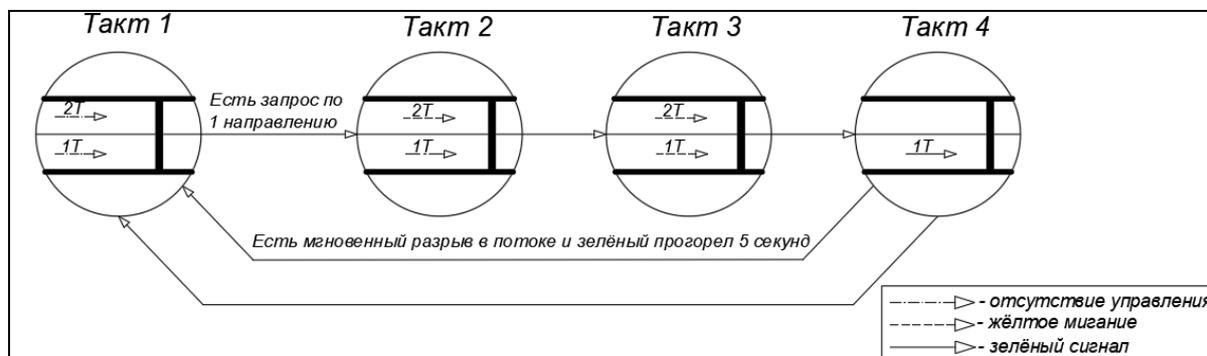


Рисунок 13. – Потактовое переключение

Разработана схема предлагаемого размещения светофоров и основных элементов дорожной инфраструктуры, которая отражает планируемую организацию движения на рассматриваемом участке (рисунок 14).

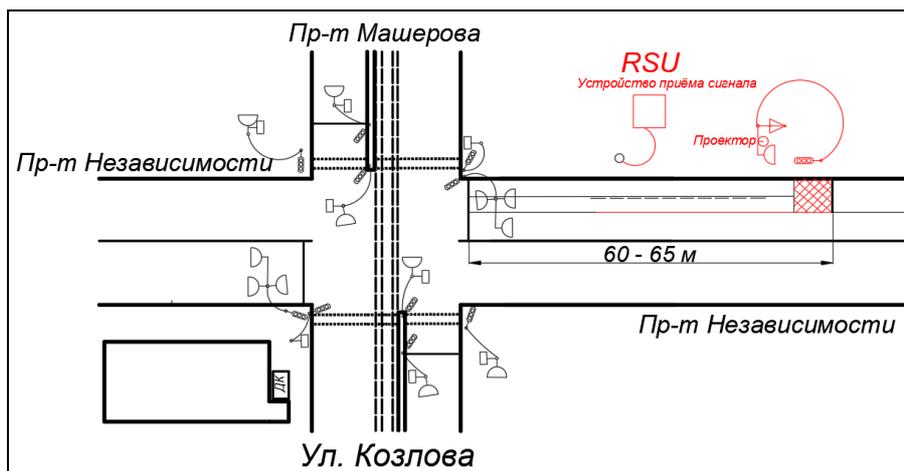


Рисунок 14. – Схема предполагаемого размещения светофоров и основных элементов дорожной инфраструктуры

Имеет смысл нанести стоп-линию за 60–65 м до перекрестка (по результатам замеров максимальной очереди). Справа, на тротуаре или газоне, согласно СТБ 1300, на расстоянии 10 м от стоп-линии устанавливается граненая 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 черным 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 автобуса. Перед стоп-линией наносится разметка 1.37 и устанавливается экран со светоотражающей краской для проецирования сигналов с проектора (рисунок 15). Также в 20 м от самого перекрестка на опоре освещения будет установлен коммуникационный модуль TEDIX системы LTE-V2X для передачи запроса от водителя к дорожному контроллеру.



Рисунок 15. – Визуальное представление проектного решения на исследуемом объекте

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

LTE-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) – это современный стандарт связи, разработанный для обеспечения взаимодействия между транспортными средствами и дорожной инфраструктурой. LTE-V2X сочетает преимущества сотовых сетей (4G/5G) и прямых радиоканалов. Это позволяет достичь высокой надежности передачи данных и минимальной задержки, что особенно важно для задач управления уменьшения блокировок движения маршрутного пассажирского транспорта в условиях городской среды. Интеграция с мобильными сетями открывает возможности для масштабируемых решений, охватывающих протяженные маршруты и сложные транспортные узлы.

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

Архитектура этой системы строится на следующих ключевых компонентах:

- бортовой модуль LTE-V2X (OBU – On Board Unit (TEDIX)) – устройство, устанавливаемое в салоне автобуса, 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 приема информации от придорожного коммуникационного модуля (рисунки 16 и 17);

- придорожный коммуникационный модуль (RSU – Road Site Unit (TEDIX)) – придорожный терминал, принимающий запросы от OBU и передающий их на светофорный контроллер, например, СИДК (рисунок 18);

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

Принцип работы системы следующий: водитель автобуса или троллейбуса, заметив затор на выделенной полосе, нажимает кнопку, запускающую передачу сообщения с параметрами автобуса на RSU (частотный диапазон 5,9 ГГц). Дорожный контроллер получает запрос от RSU, включает зеленый сигнал светофора для выделенной полосы и временно ограничивает движение транспортным средствам, движущимся по второй полосе, устраняя блокировку. Подтверждение о получении запроса от водителя отображается на интерфейсе OBU, информируя водителей.



Рисунок 16. – Бортовой модуль LTE-V2X (TEDIX)



Рисунок 17. – Мобильное приложение на базе операционной системы Android



Рисунок 18. – Придорожный коммуникационный модуль RSU

Представленные технические решения и алгоритмы направлены на повышение безопасности и оптимизацию движения маршрутного пассажирского транспорта за счет 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 важно 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 высокореалистичную 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 1,5 ч для каждого рассматриваемого варианта. Симуляции были проведены в 21 прогон.

В качестве показателя результативности использовались показатели общих задержек транспортных средств на исследуемом перекрестке, которые были рассчитаны с помощью SUMO. Система рассчитала задержки [3; 4] для всех транспортных средств: автобусов, 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 расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Общие задержки транспортных средств (за 1,5 ч)

Общие задержки, авт*ч	Существующие	Предлагаемые Вариант-1	Предлагаемые Вариант-2
Автобусы	0,63	0,47	0,49
Прямодвижущиеся ТС	26,79	25,69	25,42
Правоповоротные ТС	12,99	11,75	11,8

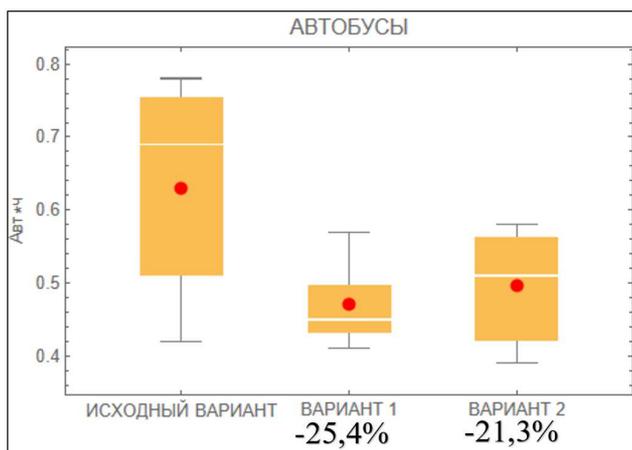


Рисунок 19. – Сравнительная бокс-диаграмма общих задержек автобусов

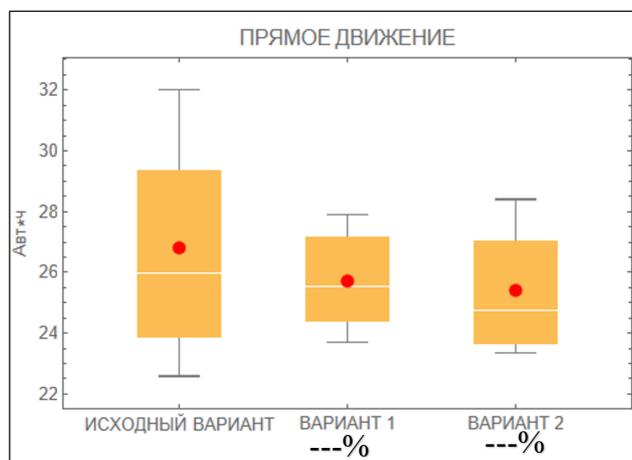


Рисунок 20. – Сравнительная бокс-диаграмма общих задержек транспортных средств, движущихся в прямом направлении

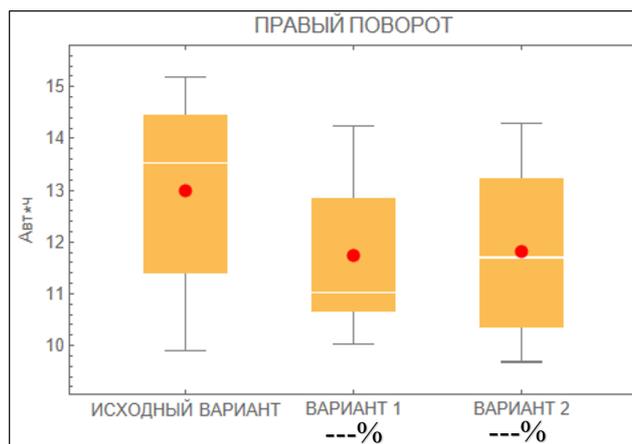


Рисунок 21. – Сравнительная бокс-диаграмма общих задержек транспортных средств, движущихся направо

Сравнительные бокс-диаграммы задержек ТС при различных вариантах – см. рисунки 19–21.

На основании приведенных данных анализа бокс-диаграмм можно сделать вывод, что введение первого варианта проектного решения является достаточно результативным, и что его использование приведет к снижению задержек для маршрутных транспортных средств на 25,4%. Введение второго варианта проектного решения даст возможность снизить задержки для маршрутных транспортных средств на 21,3%. Для прямодвижущихся и правоповоротных транспортных средств ситуация не изменилась.

Результаты расчета годовых потерь 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
Автобусы	81 497	60 799	63 386
Прямодвижущиеся ТС	247 540	237 376	234 881
Правоповоротные ТС	120 028	108 570	109 032

Таким образом, проектное решение, при капитальных вложениях 4641 у.е.: потери от задержек транспортных средств снижаются на 20 698 у.е./год; срок окупаемости капиталовложений – 80 дн.; годового экономического эффект составит 19 167 у.е./год; при этом на 1 у.е. капитальных вложений потери от задержек сокращаются на 4,46 у.е./год.

Заключение. Разработаны и внедрены подходы к гибкому управлению светофорами на базе интеллектуальных транспортных систем для обеспечения уменьшения блокировок движения маршрутных транспортных средств другими транспортными средствами. Апробация выполнена на перекрестке проспекта Независимости – проспекта Машерова – улицы Козлова. Данный перекресток является одним из наиболее загруженных транспортных узлов городской транспортной сети г. Минска, где часто маршрутные пассажирские транспортные средства блокируются правоповоротными транспортными средствами, которые, в свою очередь, блокируются из-за пешеходов, переходящих проезжую часть, особенно в часы пик.

Разработаны: алгоритм управления, предполагающий активацию диаграммы светофорного регулирования, где неиспользуемое время не сокращается (Вариант-1), и алгоритм управления, предполагающий активацию диаграммы светофорного регулирования на один цикл, где неиспользуемое время сокращается до минимума в случае отсутствия дополнительных маршрутных транспортных средств (Вариант-2).

Оценка показателей эффективности была произведена с помощью имитационного моделирования в SUMO. Получены следующие показатели эффективности: 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 маршрутных пассажирских транспортных средств уменьшились на 20 698 у.е./год; срок окупаемости капиталовложений – 80 дн.; годового экономического эффект составит 19 167 у.е./год; при этом на 1 у.е. капитальных вложений потери от задержек сокращаются на 4,46 у.е./год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В., Семченков С.С., Ларин О.Н. Повышение эффективности применения информации при организации перевозок пассажиров в городах // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 323–330. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-4-323-330

2. Кузнецов А.В., Кузнецова Е.В. Пути повышения эксплуатационной скорости наземного городского пассажирского транспорта общего пользования // Наука и техника. – 2015. – № 2. – С. 130–134.
3. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
4. Кот Е.Н., Капский Д.В., Коржова А.В. Технические средства организации дорожного движения: практикум: учеб. пособие. – Минск: БНТУ, 2016. – 239 с.

REFERENCES

1. Kapskii, D.V., Semchenkov, S.S. & Larin, O.N. (2022). Povyshenie effektivnosti primeneniya informatsii pri organizatsii perevozok passazhirov v gorodakh [Improving the Efficiency of Information Application in the Organization of Passenger Transportation in Cities]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 21(4), 323–330. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-4-323-330 (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Kuznetsov, A.V. & Kuznetsova, E.V. (2015). Puti povysheniya ekspluatatsionnoi skorosti nazemnogo gorodskogo passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, (2), 130–134. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Vrubel', Yu.A., Kapskii, D.V. & Kot, E.N. (2006). *Opredelenie poter' v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
4. Kot, E.N., Kapskii, D.V. & Korzhova, A.V. (2016). *Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya: praktikum: ucheb. posobie*. Minsk: BNTU. (In Russ.).

Поступила 22.06.2025

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF FLEXIBLE CONTROL ALGORITHMS
TO IMPROVE THE QUALITY OF TRAFFIC OF ROUTE PASSENGER VEHICLES
AT CONTROLLED INTERSECTIONS**

LIU YUWEI, D. SARAZHINSKY

(Belarusian National Technical University, Minsk)

D. KAPSKI

(Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk;

Belarusian National Technical University, Minsk;

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus, Minsk)

The article analyzes existing methods and technologies aimed at reducing blockages of route passenger passenger vehicles at controlled intersections. Options based on intelligent transport systems, flexible traffic control algorithms and modern means of traffic light control have been developed to reduce blockages of route passenger vehicles. The effectiveness of the proposed solutions and their efficiency have been assessed using simulation micro-modeling.

Keywords: *route passenger passenger vehicles, controlled intersection, flexible control, algorithms, control.*