

ТРАНСПОРТ

УДК 625.739:656.05

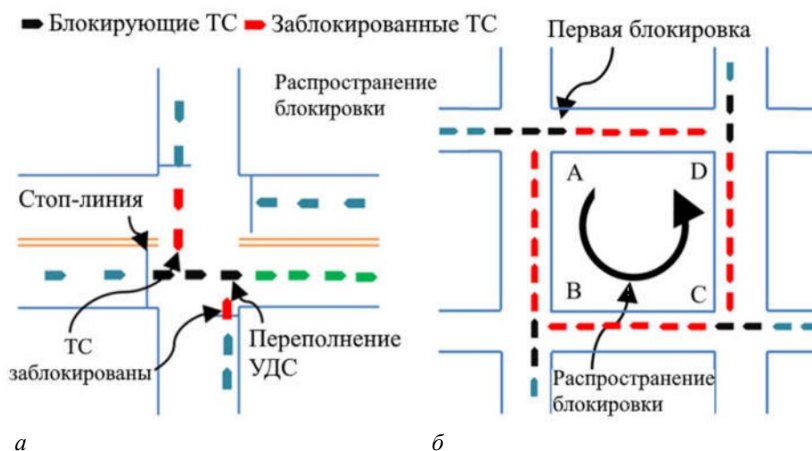
DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-14-19

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА
ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ БЛОКИРОВОК ТРАНСПОРТНОГО УЗЛАЕ.Я. ХАСИНЕВИЧ¹, д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ², А.В. КОРЖОВА³,
Г.М. КУХАРЕНКО¹, Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ³¹Белорусский национальный технический университет, Минск;²Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой;³Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск)

Одна из острых проблем современных городов – блокировка движения на перекрестках, вызванная переполнением прилегающих участков уличной сети очередями. Такая ситуация приводит к каскадному распространению заторов, значительному увеличению транспортных задержек и экономическим потерям. Целью исследования является разработка мероприятий и адаптивного алгоритма управления светофорными сигналами для предотвращения блокировок на примере сложного транспортного узла в г. Минске – пересечения улицы Притыцкого и проспекта Пушкина. Проблема данного узла идентифицирована как регулярное возникновение «стоп-волн», распространяющихся от одного перекрестка к другому и приводящих к невозможности освободить перекресток за время действия разрешающего сигнала светофора. Предложен комплексный подход, включающий изменение плана координации для смежных перекрестков, введение специальной дополнительной фазы для разблокирования перекрестка и разработку алгоритма ее адаптивного включения. Алгоритм основан на использовании данных от детекторов транспорта, установленных на определенном расстоянии от перекрестка для заблаговременного обнаружения «стоп-волны». Оценка эффективности предложенных решений выполнена методом имитационного моделирования в среде SUMO. Внедрение адаптивного управления сокращает транспортные задержки на 30%.

Ключевые слова: блокировка перекрестка, «стоп-волна», адаптивное управление, светофорное регулирование, имитационное моделирование, эффективность, организация дорожного движения.

Введение. Проблема дорожных заторов в условиях постоянно растущей автомобилизации и урбанизации является одной из ключевых для устойчивого развития мегаполисов [1]. Особую остроту приобретают непредсказуемые и масштабные заторовые ситуации, возникающие не столько из-за суточных пиковых нагрузок, а вследствие блокировки движения на ключевых, высоконагруженных перекрестках [2; 3]. Это явление, снижающее качество дорожного движения и эффективность транспортной системы города в целом, известное как «gridlock», характеризуется состоянием взаимоблокировки (рисунок 1), когда очереди транспортных средств (ТС) с одного перекрестка «запирают» движение на смежном, что приводит к полной остановке движения в нескольких направлениях и быстрому распространению затора по сети [4–7].



a – блокировка движения на перекрестке; *б* – gridlock-эффект

Рисунок 1. – Схемы блокировки движения

Механизм возникновения такой блокировки зачастую связан с феноменом «стоп-волны» – распространением волны торможения в плотном транспортном потоке в направлении, обратном движению. В городских условиях «стоп-волны» часто возникают из-за недостаточной пропускной способности перекрестков, когда очередь, оставшаяся от предыдущего цикла светофорного регулирования, не успевает рассосаться до прихода следующей группы автомобилей, движущейся в режиме координированного управления («зеленая волна»). В результате прибывающие ТС вынуждены тормозить, формируя плотную очередь, которая распространяется назад и может достигнуть предыдущего по ходу движения перекрестка, физически блокируя его.

Данная проблема весьма актуальна для г. Минска, в частности, для транспортного узла на пересечении ул. Притыцкого и проспекта Пушкина (рисунок 2). Этот узел является одним из самых загруженных в городе и регулярно испытывает блокировки в вечерний час пик, вызванные именно эффектом «стоп-волны» на перегоне между ул. Сердича и пр-том Пушкина.

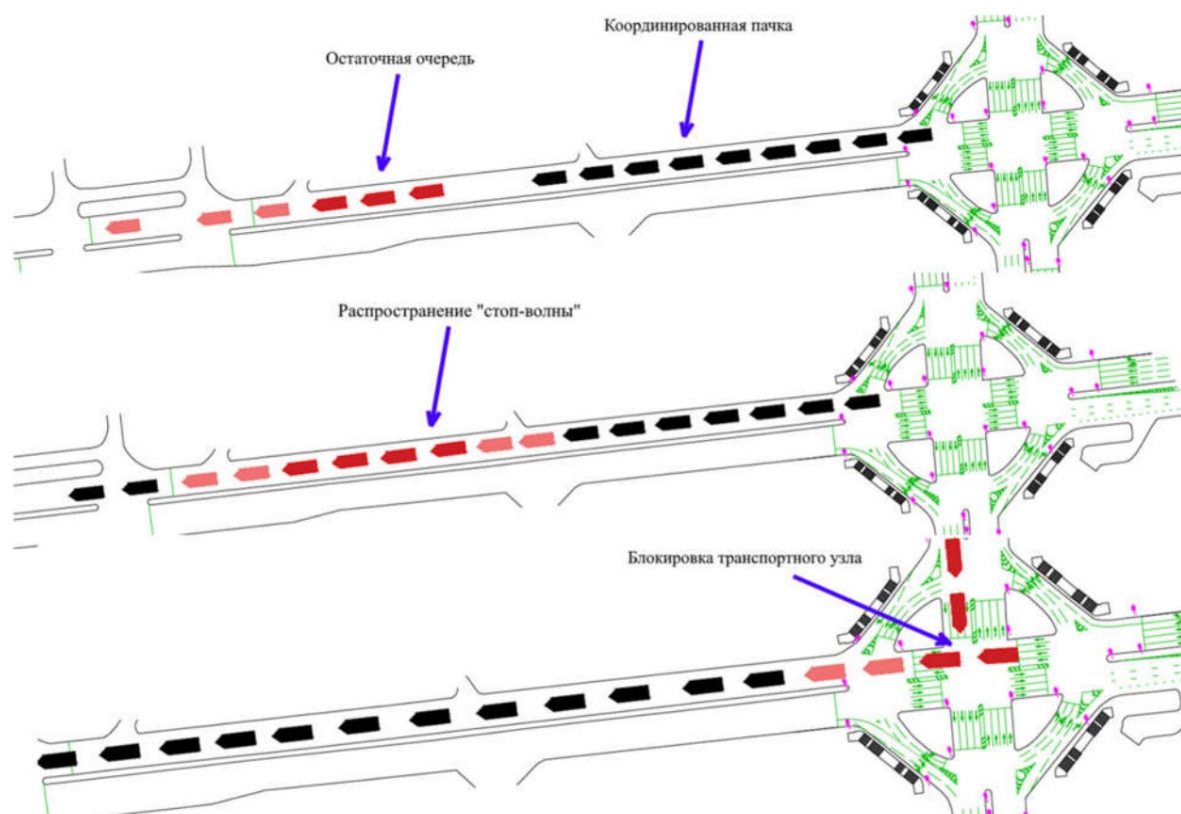


Рисунок 2. – Процесс блокировки транспортного узла

Традиционные методы управления, основанные на жестких программах координации, оказываются неэффективными. Решение проблемы требует внедрения интеллектуальных транспортных систем (ИТС), способных адаптироваться к текущей дорожной обстановке. Современные стратегии предотвращения блокировок базируются на принципах ограничения въезда на переполненный участок или, наоборот, принудительного освобождения блокируемого перекрестка.

Целью работы является создание и оценка эффективности алгоритма адаптивного управления, который позволяет заблаговременно идентифицировать угрозу блокировки и активировать специальные меры для ее предотвращения, минимизируя при этом негативное влияние на общую эффективность дорожного движения.

Основная часть. *Характеристика объекта и анализ проблемы.* Исследуемый транспортный узел включает пересечение ул. Притыцкого с пр-том Пушкина, а также прилегающие регулируемые пересечения и перегоны (с улиц Матусевича, Одоевского, Жудро, Сердича, Берута, Ольшевского). Движение по обоим магистралям осуществляется в режиме координированного управления, однако в вечерний час пик (17:45–19:45) наблюдаются регулярные сбои в работе системы.

Натурные обследования и анализ данных показали, что ключевая проблема возникает на перегоне ул. Притыцкого при движении в сторону МКАД. После пересечения с ул. Сердича транспортный поток сталкивается с остаточной очередью на перекрестке с пр-том Пушкина. Пропускная способность этого перекрестка в данном направлении ограничена, и за время действия разрешающего сигнала не все накопившиеся автомобили успевают его проехать. В то же время прибытие группы автомобилей с перекрестка ул. Сердича приводит к резкому уплотнению потока и формированию «стоп-волны», движущейся назад со скоростью около 5 м/с. Эта

волна достигает перекрестка Притыцкого–Пушкина как раз к моменту окончания разрешающего сигнала, в результате чего несколько автомобилей остаются на перекрестке, блокируя движение по пр-ту Пушкина (см. рисунок 2).

Анализ существующих стратегий управления показал, что наиболее перспективным для текущих условий Республики Беларусь, где технологии подключенных автомобилей (Connected Vehicles, CV) еще не получили широкого распространения, является подход, основанный на данных от стационарных детекторов транспорта. Стратегии, подобные «Bang-Bang», предложенной Михалопулосом, предполагают переключение фаз при достижении очередями предельных значений, что позволяет гибко перераспределять время зеленого сигнала между конфликтующими направлениями.

Для решения идентифицированной проблемы был предложен трехэтапный подход.

Изменение координированного управления. Первым шагом стала коррекция существующего плана координации по ул. Притыцкого (рисунок 3). Исходный план не обеспечивал достаточного времени для рассеивания остаточной очереди на перекрестке с проспектом Пушкина. Путем имитационного моделирования были подобраны новые сдвиги (offsets) для светофорных объектов на пересечениях с ул. Жудро и ул. Сердича. Сдвиг на СФО «Притыцкого–Жудро» был увеличен на 23 с, а на СФО «Притыцкого–Сердича» – на 10 с. Это позволило «отодвинуть» время прибытия координированной группы автомобилей, дав очереди на проблемном перекрестке дополнительное время на уменьшение, что снизило вероятность возникновения «стоп-волны».

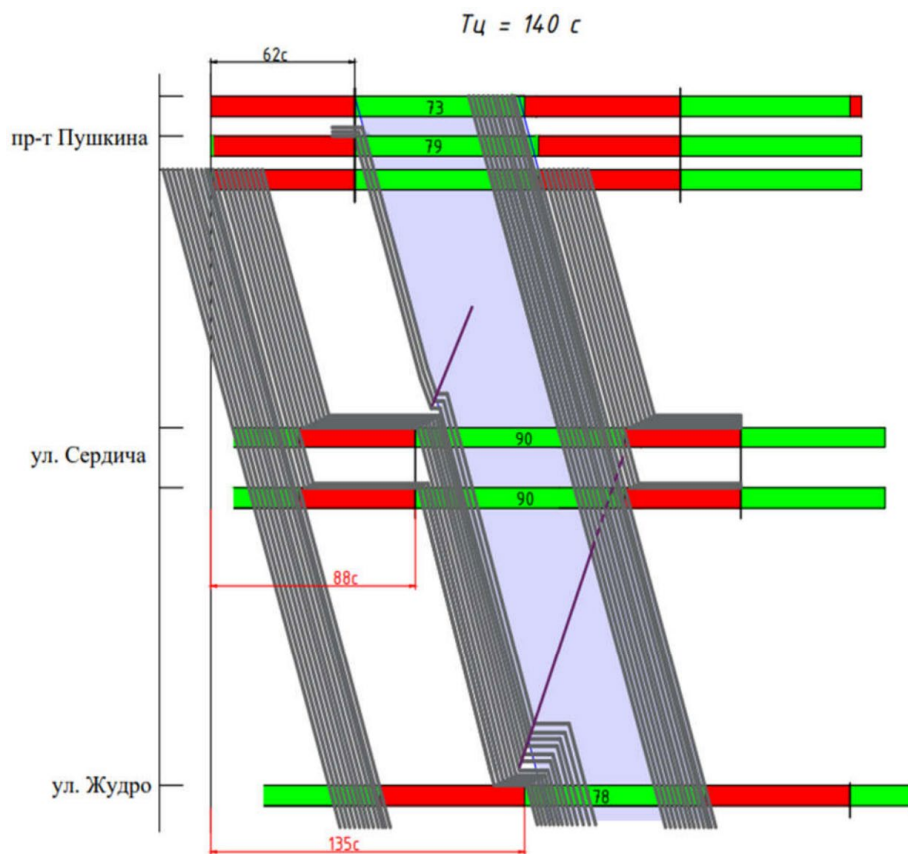


Рисунок 3. – Графическое представление предлагаемого плана координации

Использование дополнительной фазы светофорного регулирования. Поскольку изменение только координации не может полностью исключить проблему при пиковых нагрузках, следующим шагом стало введение специальной дополнительной (третьей) фазы на светофорном объекте «Притыцкого – Пушкина». Основная идея этой фазы – обеспечить принудительное освобождение перекрестка автомобилями, движущимися по ул. Притыцкого, которые попали в «стоп-волну» и рискуют остаться на перекрестке. Эта фаза включается после завершения основной фазы для движения по ул. Притыцкого и до начала движения по пр-ту Пушкина. Для ее реализации предлагается использовать направление 16 (правый поворот с ул. Притыцкого на пр-т Пушкина), разрешив ему движение на несколько секунд дольше. В качестве длительности дополнительной фазы было выбрано 10 с (1 с основной такт + 9 с промежуточный), что достаточно для освобождения перекрестка без значительного влияния на общую продолжительность цикла (140 с) и безопасность движения. Важно отметить, что аналогичная специальная фаза уже реализована на данном объекте, что подтверждает практическую применимость идеи, однако ее работа не носит адаптивный характер.

Разработка алгоритма адаптивного управления. Постоянное использование дополнительной фазы неэффективно, поскольку блокировки возникают не каждый цикл. Поэтому был разработан алгоритм ее адаптивного включения, основная задача которого – заблаговременно обнаружить «стоп-волну», движущуюся к перекрестку.

Содержание алгоритма (рисунок 4):

1. Определение временного окна. Алгоритм активен только в определенный временной интервал внутри цикла. Расчеты, основанные на скорости распространения «старт-волны» и «стоп-волны», показали, что критический интервал, в который возникновение «стоп-волны» гарантированно приведет к блокировке, находится между 19-й и 42-й секундами до окончания разрешающего сигнала по направлению 16.

2. Детекция «стоп-волны». Для обнаружения волны предлагается установить три индуктивных детектора в одной полосе на расстоянии 100 м от стоп-линии перекрестка ул. Притыцкого–пр-т Пушкина. Небольшая зона детекции (0,5 м) и расстояние между детекторами (2,5 м) позволяют надежно фиксировать остановку или медленное движение ТС в плотном потоке.

3. Условие активации. Если в течение определенного временного окна (см. п. 1) хотя бы один из трех детекторов зафиксирует непрерывное присутствие автомобиля в течение порогового времени (экспериментально установлено значение в 10 с), система делает вывод о наличии «стоп-волны».

4. Принятие решения. При выполнении условий (п. 1 и п. 3) алгоритм инициирует включение дополнительной 10-секундной фазы в текущем цикле.



Рисунок 4. – Блок-схема алгоритма

Для внедрения данного алгоритма требуется замена существующего дорожного контроллера ДУМКА-С на более современный (например, СИДК) с поддержкой расширенного функционала и подключения внешних детекторов.

Моделирование и оценка эффективности. Оценка эффективности разработанных мероприятий проводилась с использованием программного комплекса для имитационного микромоделирования SUMO. Была создана и откалибрована по натурным данным детализированная модель исследуемого участка. Калибровка включала настройку параметров модели следования за лидером (модель Краусса) для достижения реалистичного поведения водителей. Кроме того, следует отметить, что детекция «стоп-волны» должна осуществляться только для временного интервала, в котором возникновение «стоп-волны» гарантированно приведет к блокировке движения по ул. Пушкина. Этот интервал можно найти из геометрического построения, представленного на рисунке 5.

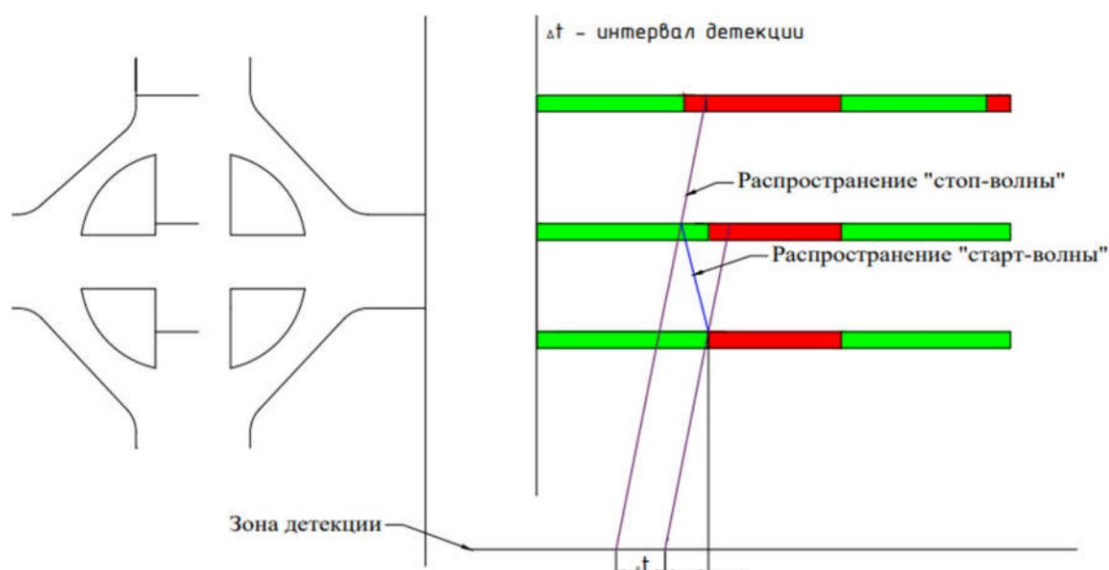


Рисунок 5. – Пространственно-временная схема расчета интервала детекции

Что касается общего местоположения детекторов, то они должны быть установлены после исследуемого транспортного узла на расстоянии 100 м от последней стоп-линии (рисунок 6). Это расстояние обусловлено тем, что необходимо определить потенциальную блокировку перекрестка за 19 с (15 с промежуточный такт второй фазы, 1 с основной такт третьей фазы и 3 с зеленых миганий, которые входят в разрешающий сигнал) до окончания действия разрешающего сигнала для 16-го направления, с расчетом, что «стоп-волна» распространяется со скоростью 5 м/с. Также предполагается, что детекторы будут установлены только в одной полосе, указанной на рисунке 6, поскольку этого достаточно для обнаружения «стоп-волны».

Были проведены симуляции двух сценариев в течение 1 ч пиковой нагрузки:

Сценарий 1 (существующий): моделирование с существующей схемой организации дорожного движения.

Сценарий 2 (предлагаемый): моделирование с внедренными изменениями плана координации и работающим адаптивным алгоритмом включения дополнительной фазы.

Общие часовые задержки для существующего варианта составили 275 авт-ч, а для предлагаемого – 193 авт-ч. Удельные задержки (в среднем на одно ТС) сократились со 125 до 88 с. Таким образом, комплексное внедрение предложенных мероприятий обеспечивает снижение как общих, так и удельных задержек на 30%.

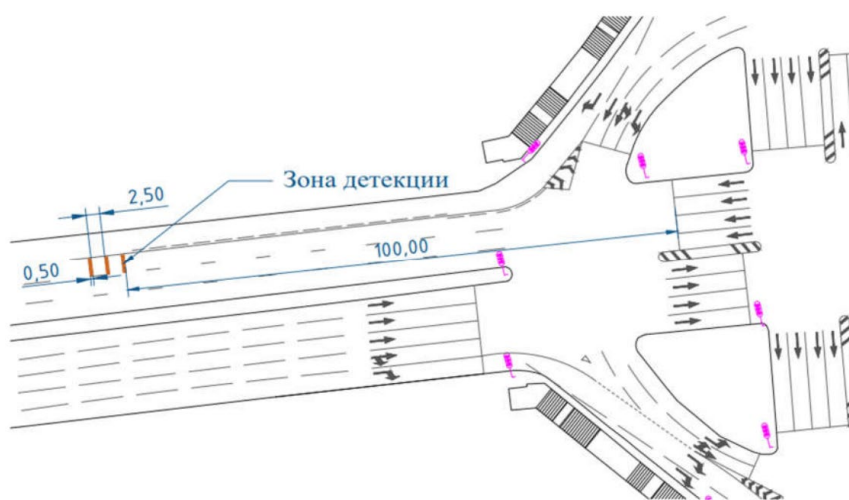


Рисунок 6. – Места установки детекторов

Заключение. В рамках исследования была решена актуальная научно-практическая задача предотвращения блокировок сложного транспортного узла в г. Минске. Выявлен и детально описан механизм возникновения регулярных блокировок на пересечении ул. Притыцкого и пр-та Пушкина, связанный с формированием и распространением «стоп-волны».

Разработан комплексный подход, сочетающий статические и динамические методы управления: предложены изменения в плане координированного управления, снижающие вероятность возникновения «стоп-волны»; обоснована необходимость введения дополнительной фазы светофорного регулирования для принудительного освобождения перекрестка; разработан оригинальный адаптивный алгоритм активации этой фазы, основанный на заблаговременной детекции «стоп-волны» с использованием стандартных детекторов транспорта.

С помощью имитационного моделирования в среде SUMO доказана высокая результативность предложенных решений: снижение общих и удельных транспортных задержек в часы пик составляет 30%.

Разработанный алгоритм и комплекс мероприятий являются эффективным, экономически обоснованным и технически реализуемым решением, которое может быть применено для повышения пропускной способности и надежности функционирования не только исследуемого узла, но и других аналогичных проблемных участков городской уличной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В. Трансформация элементов дорожно-транспортной инфраструктуры для повышения качества жизни // Современная урбанистика: социальное благополучие и цифровая трансформация города: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. / Минск (30 нояб. 2023 г.) – Минск: М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т, 2024. – С. 167–173. EDN PYQLFZ
2. Энтропия дорожного движения и учет аварийности для оценки устойчивости пассажирского транспорта мегаполиса / Ю.П. Важник, Д.В. Капский, Д.В. Навой и др. // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XIII междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году качества. В 2 ч. / Гомель (21–22 нояб. 2024 г.). – Гомель: Белорус. гос. ун-т транспорта, 2024. – С. 51–52. EDN FHCESI

3. Капский Д.В. Методологические основы создания системы повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности в Республике Беларусь // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2009. – № 6. – С. 81–88. EDN WXONBB
4. Капский Д.В., Луцкович А.С. Градостроительные аспекты организации движения // Перспективы развития транспортного комплекса: материалы IV Междунар. заоч. науч.-практ. конф. / Минск (02–04 окт. 2018 г.). – Минск: Белорус. науч.-исследоват. ин-т транспорта «Транстехника», 2018. – С. 90–95. EDN YTKOMX
5. Врубель Ю.А., Капский Д.В. Водителю о дорожном движении: пособие для слушателей учебного центра подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров автотракторного факультета. – 3-е изд., доработ. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2010. – 139 с. EDN VRUNOY
6. Рутковский В.Н., Капский Д.В. Анализ, разработка и реализация адаптивных алгоритмов (гибкого) светофорного регулирования // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 3. – С. 4–16. DOI 10.21122/2309-4923-2023-3-4-16. EDN XEUMZW
7. Координированное управление дорожным движением / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Д.В. Рожанский и др. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2011. – 230 с. EDN TLBBOV

Поступила 30.03.2026

DEVELOPMENT AND EFFECTIVENESS EVALUATION OF AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR PREVENTING TRAFFIC NODE BLOCKAGE

*E. KHASINEVICH¹, V. IVANOV², A. KORZOVA³,
G. KUCHARONAK¹, D. MOZALEVSKI³*

(¹Belarusian National Technical University, Minsk;

²Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;

³Branch of BNTU "Research Polytechnic Institute", Minsk)

The article addresses one of the most acute problems of modern cities – intersection blockage caused by queue spillback from adjacent sections of the road network. Such situations lead to the cascading spread of congestion, a significant increase in traffic delays, and economic losses. The study aims to develop a set of measures and an adaptive traffic signal control algorithm to prevent blockages, using a complex transport node in Minsk – the intersection of Pritytskogo Street and Pushkina Avenue – as a case study. The problem at this node is identified as the regular occurrence of "stop-waves" that propagate from one intersection to another, making it impossible to clear the intersection during the green signal time. A comprehensive approach is proposed, which includes modifying the coordination plan for adjacent intersections, introducing a special additional phase to «flush» the blocked intersection, and developing an algorithm for its adaptive activation. The algorithm is based on data from physical vehicle detectors installed at a certain distance from the intersection for early detection of the «stop-wave». The simulation results showed that the implementation of adaptive control reduces total and specific traffic delays by 30%.

Keywords: *intersection blockage, gridlock, stop-wave, adaptive control, traffic signal control, intelligent transport systems, simulation modeling, traffic management efficiency.*