

На правах рукописи



Артемов Александр Юрьевич

**Повышение эффективности управления транспортными потоками на
магистральных улицах малых и средних городов**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Орел – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Научный руководитель: **Дорохин Сергей Владимирович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Шевцова Анастасия Геннадьевна**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»;

Булатова Ольга Юрьевна
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Организация перевозок и дорожного движения», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «28» февраля 2024 г. в 14.00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.032.03 на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орел, пл. Каменская, д.1.

Автореферат разослан _____ 202_ г. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>).

*Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, в двух экземплярах направлять в диссертационный совет 99.2.032.03 по адресу:
302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77, тел.: +79606476660,
e-mail: srmostu@mail.ru*

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Васильева В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Активное внедрение и использование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) объясняется довольно быстрым эффектом, в плане управления транспортными потоками на основании снижения задержек транспортных средств и как следствие повышение пропускной способности. Сегодня, ИТС представлены различными видами оборудования, позволяющими управлять транспортными процессами, а также осуществлять их мониторинг. В связи с необходимостью обеспечения безостановочного процесса движения, ИТС в основном располагаются на федеральных участках трасс, в крупнейших и крупных агломерациях и крупнейших и крупных городах. В малых и средних городах, несмотря на аналогичные транспортные проблемы, применение ИТС пока не реализуется в полной мере. В условиях таких городов, на различных участках улично-дорожной сети (УДС) довольно часто возникают длительные задержки автотранспорта, что может стать причиной возникновения дорожно-транспортных происшествий (ДТП). В таких условиях, альтернативным подходом к улучшению транспортной ситуации является применение новых методов и алгоритмов для работы имеющегося оборудования, особенно при осуществлении управления движением транспортных потоков с помощью светофоров.

На протяжении многих лет светофорное регулирование продолжает оставаться наиболее эффективным способом управления транспортными потоками, что и объясняет его востребованность как с практической точки зрения, так и с научной. Особое внимание в научном аспекте исследования светофорного управления уделяется методам и алгоритмам, их уточнению и совершенствованию. Сегодня, в малых и средних городах, обладающих отдельными видами исполнительных элементов, развитие ИТС обеспечивается применением новых методов и алгоритмов, которые в определенной степени поддерживают требуемые показатели, в том числе и при управлении транспортными потоками.

В большинстве городов Российской Федерации, имеются магистральные улицы, управление транспортными потоками на которых осуществляется с помощью светофоров. Но определенная загруженность связанных участков требует оперативного изменения циклов и, как следствие, режимов работы светофора. Если в больших, крупных, крупнейших и сверхкрупных городах имеются ресурсы для выполнения данных операций, в виду постоянного мониторинга через специализированные центры организации дорожного движения (ЦОДД), то отсутствие таких возможностей в малых и средних городах, приводит к возникновению транспортных проблем – заторов, что в первую очередь требует совершенствования методов управления, чем и объясняется актуальность темы исследования.

Степень разработанности темы. Работы в этой области ведутся в научных и высших образовательных учреждениях, таких как: НИИАТ, МАДИ, СПбГАСУ, ОГУ им. И.С. Тургенева, БГТУ им. В.Г. Шухова, ТулГУ и других организациях. Этим направлением занимались такие ученые как: Ю.А. Врубель, М.Ю. Кременец, М.Б. Афанасьев, А.А. Поляков, Д. Дрю, Г.И. Клинковштейн, В.А. Корчагин, Е.М. Лобанов, А.Ю. Михайлов, С.В. Жанказиев, В.В. Зырянов, А.Н. Новиков, И.А. Новиков, С.А. Евтюков, И.Е. Агуреев, В.В. Сильянов, М.Р. Якимов, А.Г. Шевцова, Д. Берри, А. Миллер, Ф. Вебстер, Б. Кобб, Б. Петерсен и др. ученые.

В результате выполненных работ предложен ряд методов и средств, позволяющих повысить эффективность светофорного регулирования. Однако в трудах этих ученых недостаточно рассматриваются вопросы координированного управления движением транспортных потоков.

Цель работы – снижение потерь времени участниками дорожного движения за счет эффективной организации светофорного регулирования на магистральных улицах.

Для достижения цели были поставлены следующие взаимосвязанные задачи:

1. Выполнить анализ методов и условий ввода согласованного типа управления регулируемых перекрестков;
2. Определить значения показателей транспортных потоков на пересечениях магистральной улицы УДС малых и средних городов Воронежской области;
3. Усовершенствовать условия ввода согласованного типа управления транспортными потоками на пересечениях магистральной улицы при изменении показателей транспортного потока;
4. Разработать алгоритм принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления;
5. Осуществить оценку разработанного алгоритма с помощью определения эколого-экономических показателей.

Объект исследования – процесс движения транспортных средств на пересечениях магистральной улицы с согласованными регулируемыми перекрестками.

Предмет исследования – транспортные потоки и величина задержки транспортных средств.

Научная новизна:

1. Путем корреляционного анализа установлены зависимости между параметрами интенсивности дорожного движения на основной (координируемой) улице и параметрами интенсивности дорожного движения второстепенных (прилегающих) улиц, позволяющие выполнить координированное управление движением транспортных потоков и снизить время задержки транспорта.

2. На основе математической зависимости, описываемой полиномиальной функцией второй степени $k_t = 0,8264 \cdot k_N^2 - 0,8727 \cdot k_N + 0,834$ с достоверностью 87% установлен параметр коэффициента соотношения задержек транспорта.

3. На основе разработанного алгоритма принятия решения установлены коэффициенты соотношения, позволяющие осуществить выбор наиболее эффективного способа координированного управления движением транспортных потоков путем светофорного регулирования.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Установлены зависимости между показателями транспортных потоков на магистральной улице и согласованными регулирующими перекрестками. Разработан алгоритм принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления регулируемых перекрестков, входящих в состав магистральных улиц.

Результаты исследования имеют прикладной характер и могут быть использованы при реализации программ развития систем управления дорожным движением на перекрестках, расположенных в малых и средних городах. Полученные результаты позволяют снизить среднюю величину задержки на регулируемых перекрестках, управление которых согласованно, что позволит повысить комплексную эффективность функционирования улично-дорожной сети посредством систем светофорного регулирования, в том числе автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД).

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость между основными показателями транспортных потоков – интенсивности и задержек, применительно к согласованному типу управления регулируемых перекрестков.
2. Алгоритм принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления регулируемых перекрестков.
3. Результаты экспериментальных исследований на УДС г. Павловск и г. Россошь с определением изменения экономических и экологических показателей.

Методология и методы исследования. Теоретико-методологической основой исследования явились натурные наблюдения, статистический анализ, математическое моделирование, имитационное моделирование, экспериментальные методы обследования транспортных потоков.

Информационная база исследования. Законодательные и нормативные правовые акты, Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозным периодом до 2035 года, Федеральные и региональные целевые программы развития транспортных систем, материалы федеральных и региональных органов власти и управлений, статистические данные.

Степень достоверности результатов. Достоверность диссертационного исследования подтверждена экспериментально, обеспечивается исследованием

существующих методов управления движением транспортных потоков, корректным применением продуктов имитационного моделирования и оценкой адекватности выполненных процедур.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности. Выполненные исследования отвечают формуле паспорта научной специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта по пункту 3 «Исследование закономерностей, разработка моделей, алгоритмов и специального программного обеспечения в решении задач проектирования, организации, планирования, управления и анализа транспортного процесса» и пункту 5 «Организация и управление грузовыми и пассажирскими автомобильными перевозками, автотранспортными потоками, транспортное планирование и моделирование».

Апробация работы. Основные положения и результаты исследования доложены, обсуждены и одобрены на Международных научно-практических конференциях и форумах: «Информационные технологии и инновации на транспорте» (Орел, 2020, 2021, 2022, 2023), «Организация и безопасность движения в крупных городах» (Санкт-Петербург, 2020), «Организация и безопасность дорожного движения» (Тюмень, 2020), «2020 International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment» (Севастополь, 2020), «VIII International Scientific Conference Transport of Siberia» (Новосибирск, 2021), «International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia» (Новосибирск, 2021), «Актуальные вопросы и перспективы развития современной науки» (Воронеж, 2022), «Технология транспортных процессов - настоящее и будущее» (Воронеж, 2021), «Проблемы и перспективы конструктивного совершенствования отечественного автомобилестроения» (Воронеж, 2023), «Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering» (Ростов-на-Дону, 2023), «Технология транспортных процессов: состояние, проблемы, перспективы» (Воронеж, 2023), «Проблемы социально-экономической устойчивости региона» (Пенза, 2021).

Реализация результатов работы. Основные теоретические результаты исследования реализованы в виде специализированных алгоритмов и методов, а также методических рекомендаций по их применению на улично-дорожной сети г. Павловск и г. Россошь, расположенных в Воронежской области, что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

Материалы исследования используются в учебном процессе при обучении бакалавров и магистров по дисциплинам «Технические средства организации дорожного движения», «Организация дорожного движения», «Моделирование и оптимизация в технологии транспортных процессов» на кафедре «Организации перевозок и безопасности движения» ФГБОУ ВО «Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова».

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 19 статьях, в том числе в 6 ведущих изданиях, из перечня рецензируемых

научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 6 в изданиях, включенных в зарубежную аналитическую базу данных SCOPUS и WoS и 7 в изданиях, входящих в базу российского индекса научного цитирования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 119 наименований и приложения. Текст диссертации изложен на 124 страницах, включает 21 таблицу, 46 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи, раскрыты научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Существующие способы управления транспортными потоками в городах» определено, что для осуществления эффективного управления городскими транспортными потоками существует ряд методов, разработанных как зарубежными, так и отечественными исследователями. В результате их анализа, определено, что для управления движением на магистральных улицах используются сложные алгоритмы, позволяющие реализовать согласованное управления, обеспечив безостановочное движением автомобилей по наиболее транзитному направлению – магистральному. Обеспечить эффективность такого типа управления позволяет постоянный мониторинг движения за счет применения различных исполнительных элементов ИТС, например детекторов транспорта, специализированных дорожных видеокамер, беспилотников, а также активно развивающихся лидарных технологий. В большинстве своем, такие элементы активно применяются в крупных городах и городских агломерациях, где это стратегически обосновано, но в малых и средних городах, которые не входят в состав агломераций, они не используются. В таком случае весь процесс управления осуществляется по средствам имеющегося оборудования и применением общепринятых методов.

Высокие темпы автомобилизации, сегодня характерны для всех без исключения городов, в том числе малых и средних, что оказывает влияние на перераспределение транспортных потоков, которое также характерно и для магистральных улиц, на которых наблюдается временное изменение трафика. При возникновении таких ситуаций необходимо осуществлять изменение режима управления, но отсутствие постоянного мониторинга движения и возможности оперативного изменения режима, появляется особая потребность в использовании методов управления, основанных на сопоставлении параметров транспортного потока как по магистральной улице, так и по второстепенным участкам, аналогичным образом, входящих в координацию.

Выполненный анализ существующих методов управления, показал, что в большинстве своем они не учитывают показатели второстепенных улиц и не регламентируют изменение режима управления при определённом снижении трафика на магистральной улице.

Во второй главе «Теоретическое обоснование применения согласованного типа управления» выполнен анализ транспортной сети малых и средних городов Воронежской области на примере г. Павловск и г. Россошь в результате, которого определены участки магистральных улиц, управление на которых согласованно (рис.1, рис.2).



Рисунок 1 – Спутниковый снимок ул. 40 лет Октября в г. Павловск, где 1 – пересечение с Микрорайоном гранитный; 2 – пересечение с ул. Гоголя; 3 – пересечение с ул. Лесной



Рисунок 2 – Спутниковый снимок ул. Пролетарская в г. Россошь, где 1 – пересечение с ул. Фрунзе; 2 – пересечение с пр. Труда; 3 – пересечение с ул. Белинского

В результате выполненного натурного обследования исследуемых магистральных улиц, были получены данные по распределению средней величины интенсивности, как на магистральной улице, так и на второстепенных участках. На магистральной улице 40 лет Октября в ходе мониторинга установлено, что средняя интенсивность на второстепенных участках – Микрорайона гранитного, ул. Гоголя и ул. Лесной (рис. 1) в определенные периоды времени превышает среднюю интенсивность на магистральной улице, на рисунке 3, такие области выделены черным цветом линии.

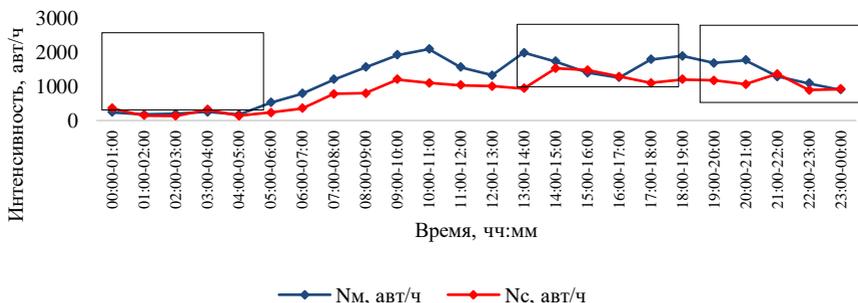


Рисунок 3 – Результаты исследования интенсивности движения на магистральной улице в г. Павловск, где N_m – средняя интенсивность движения по магистральной улице, авт/ч; N_c – средняя интенсивность движения на второстепенных участках, авт/ч.

Аналогичная ситуация наблюдалась при исследовании второй магистральной улицы, расположенной в г. Россошь (рис. 4).

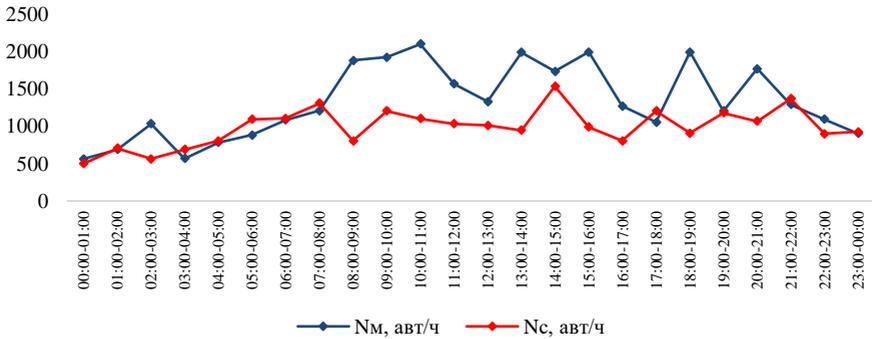


Рисунок 4 – Результаты исследования интенсивности движения на магистральной улице в г. Россошь, где N_m – средняя интенсивность движения по магистральной улице, авт/ч; N_c – средняя интенсивность движения на второстепенных участках, авт/ч.

В случае исследования магистральной улицы г. Россошь, также были определены области, в которых значение средней величины интенсивности по второстепенному направлению, превышает значение средней величины интенсивности по магистральной улице, что выделено черными линиями на рисунке 4.

Для оценки изменения транспортной ситуации на объектах исследования, особенно при изменении величины интенсивности, необходимо оценить изменение характеристик транспортного потока, в частности средней величины задержки, как на основном направлении – магистральной улице, так и на второстепенных участках.

Полученные результаты в ходе натурного обследования участка, в совокупности с моделированием в программной среде AnyLogic, позволили построить схему работы перекрестков, входящих в координацию на рассматриваемой магистральной улице, на примере улицы 40 лет Октября, расположенной в г. Павловск (рис. 5).

В результате моделирования были определены значения времени проезда по каждому из направлений координированного участка. В соответствующие блоки (рис. 5) были заданы полученные значения интенсивностей дорожного движения (рис. 3) и длительности циклов и фаз регулирования, которые позволили выполнить модельный эксперимент по оценке времени проезда координированного участка.

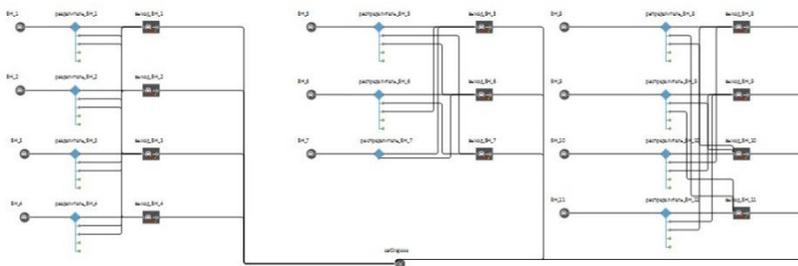


Рисунок 5 – Схема работы координируемого участка в программной среде AnyLogic

Эксперимент по оценке времени проезда был выполнен по всем направлениям рассматриваемого участка (ВН_1, ВН_2, ВН_3, ВН_4, ВН_5, ВН_6, ВН_7, ВН_8, ВН_9, ВН_10, ВН_11), отдельно для магистральной улицы – Ленинского проспекта с учетом всех направлений (ВН_1, ВН_2, ВН_5, ВН_6, ВН_8, ВН_9), отдельно для прилегающих улиц, создающих пересечения на магистральной улице, с учетом их направлений (ВН_3, ВН_4, ВН_7, ВН_10, ВН_11) и по всей сети. Окно визуализации проведения эксперимента представлено на рис. 6.

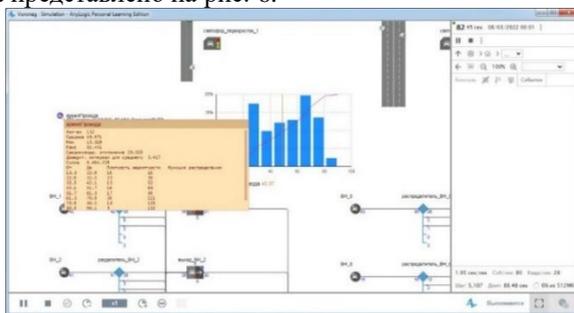


Рисунок 6 – Пример визуализации эксперимента в программной среде AnyLogic

В соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011 оценку измеряемой величины \bar{x} и x_i , за которую принимают среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений, вычисляют по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где x_i – i -й результат измерений; n – число исправленных результатов измерений (по результату расчетов, необходимого количества проведения экспериментов $n=50$).

Тогда среднее квадратическое отклонение S группы, содержащей n результатов измерений, вычисляют по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

В программе значение итераций ($n=50$) устанавливаются оператором, а значения:

- среднего времени проезда (\bar{t} , сек);
- минимальное время проезда (t_{min} , сек);
- максимальное время проезда (t_{max} , сек);
- среднеквадратическое отклонение (S);
- доверительный интервал для среднего, определены автоматически.

Полученные данные по результату выполненных измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты выполнения эксперимента по оценке времени проезда координированного участка по основным направлениям

№ п/п	Наименование направления	Количество измерений (n)	Среднее время проезда (\bar{t} , сек)	Минимальное время проезда (t_{min} , сек)	Максимальное время проезда (t_{max} , сек)	среднеквадратическое отклонение (S)	доверительный интервал для среднего
1	ВН 1	12	115,21	14,50	274,48	78,43	22,27
2	ВН 2	12	87,16	13,32	205,77	60,30	16,72
3	ВН 3	12	497,07	90,26	1023,43	291,78	81,71
4	ВН 4	12	587,07	90,59	1237,21	316,23	89,802
5	ВН 5	12	131,42	20,63	236,73	64,42	17,53
6	ВН 6	12	275,48	22,12	513,02	165,42	46,33
7	ВН 7	12	1180,19	121,77	2094,83	784,88	215,62
8	ВН 8	12	198,52	14,74	431,13	133,54	37,92
9	ВН 9	12	94,67	20,70	165,92	49,16	13,26
10	ВН 10	12	586,83	92,64	1156,77	343,58	96,22
11	ВН 11	12	575,94	90,56	1051,51	324,69	90,05

Установлено, что на прилегающих направлениях, средние, минимальные и максимальные значения измеряемого параметра при существующем цикле управления является значительно высоким в сравнении с аналогичными показателями по магистральной улице – ул. 40 лет Октября. Так, средние значения по направлениям связующих участков варьируются в пределе $\bar{t} \in [497,07; 1180,19]$, по направлениям магистральной улицы $\bar{t} \in [87,16; 275,48]$. Минимальные значения по направлениям связующих участков варьируются в пределе $t_{min} \in [90,26; 121,77]$, по направлениям магистральной улицы $t_{min} \in [13,32; 22,12]$. Максимальные значения по направлениям связующих участков варьируются в пределе $t_{max} \in [1023,43; 1237,21]$, по направлениям магистральной улицы $t_{max} \in [165,92; 2094,83]$ (рис. 7).

В результате выполнения эксперимента определено, что для связных участков, а именно направлений ВН_3, ВН_4, ВН_7, ВН_10, ВН_11 является неэффективным, т.к. время проезда значительно выше времени проезда по координированному участку.

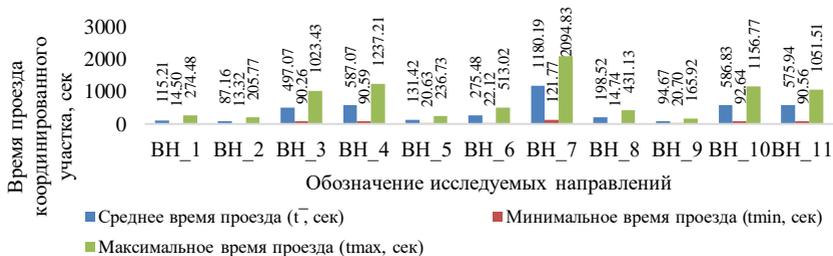
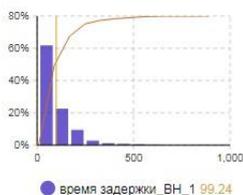


Рисунок 7 – Гистограмма распределения среднего, минимального и максимального времени проезда координированного участка дорожной сети по основным направлениям

В третьей главе «Разработка алгоритма принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления» установлены зависимости между основными показателями транспортного потока на магистральной улице и прилегающими участками – интенсивности и задержки при использовании согласованного типа управления регулируемые перекрестками, определенные соответствующими коэффициентами k_N и k_t , разработан алгоритм принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления.

По результату оценки работы координированного участка был определен один из основных параметров, который позволяет определить эффективность работы всей сети – «время проезда». В рассмотренных в главе 2 методах оценки ввода согласованного типа управления используется такой показатель как интенсивность дорожного движения, являющийся общим для всей сети, но в виду постоянного изменения интенсивности движения необходимо анализировать суммарную интенсивность на въездах, как второстепенных участков, так и основного.

С учетом показателей заданных интенсивностей движения на каждом въездном направлении, подробно описанном в главе 2 и установленным координированным циклом регулирования, были получены данные по величине задержки, представленных на рисунке 8 а-л.

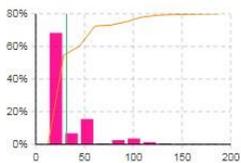


1) вид гистограммы



2) линейный вид

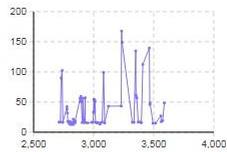
а) время задержки по направлению ВН 1



● время задержки_ВН_2 31.74

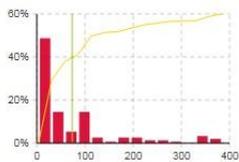
1) вид гистограммы

б) время задержки по направлению ВН 2



● время задержки_ВН_2

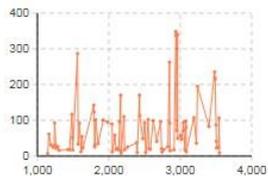
2) линейный вид



● время задержки_ВН_3 73.49

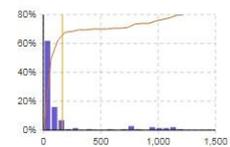
1) вид гистограммы

в) время задержки по направлению ВН 3



● время задержки_ВН_3

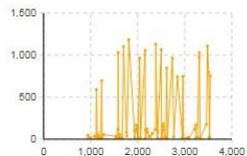
2) линейный вид



● время задержки_ВН_4 166.64

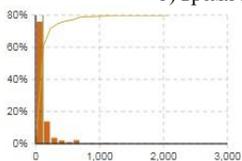
1) вид гистограммы

г) время задержки по направлению ВН 4



● время задержки_ВН_4

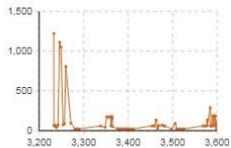
2) линейный вид



● время задержки_ВН_5 114.93

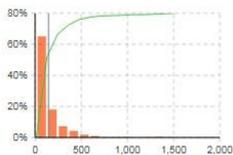
1) вид гистограммы

д) время задержки по направлению ВН 5



● время задержки_ВН_5

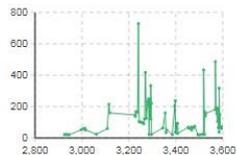
2) линейный вид



● время задержки_ВН_6 146.34

1) вид гистограммы

е) время задержки по направлению ВН 6



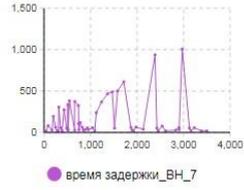
● время задержки_ВН_6

2) линейный вид

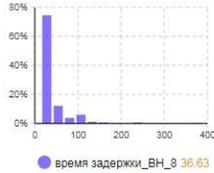


1) вид гистограммы

ж) время задержки по направлению ВН 7

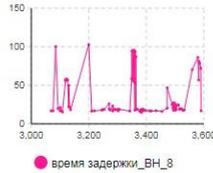


2) линейный вид

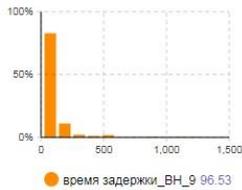


1) вид гистограммы

з) время задержки по направлению ВН 8

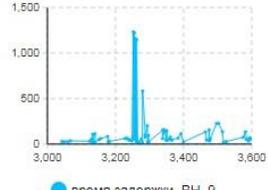


2) линейный вид

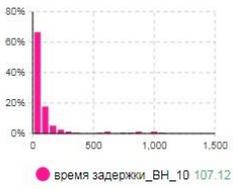


1) вид гистограммы

и) время задержки по направлению ВН 9



2) линейный вид

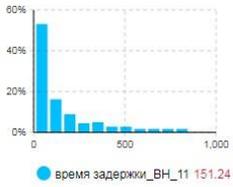


1) вид гистограммы

к) время задержки по направлению ВН 10



2) линейный вид



1) вид гистограммы

л) время задержки по направлению ВН 11



2) линейный вид

Рисунок 8 – Визуализация результатов определения времени задержки по направлениям рассматриваемого участка

Определено, что в соответствии с основными рекомендациями по вводу координируемого управления, транзитность основного участка, на основании данных которого вводится режим координации должны быть обеспечена интенсивностью выше 70%. В рассматриваемом случае среднее значение по такому участку (\bar{N}_0) составляет 5598 ед/ч, среднее значение по второстепенным улицам (\bar{N}_B) составляет 1238 ед/ч, что позволяет определить коэффициент соотношения интенсивностей (k_N) при координированном управлении:

$$k_N = \frac{\bar{N}_B}{\bar{N}_0}, \quad (3)$$

где k_N – коэффициент соотношения интенсивностей дорожного движения; \bar{N}_B – средняя интенсивность движения по второстепенным (не координируемым) участкам, ед/ч; \bar{N}_0 – средняя интенсивность движения по основному (координируемому) участку, ед/ч;

В результате расчетов, установлено, что коэффициент в данном случае составляет 0,22, что удовлетворяет требованиям ввода координации, т.к. транзитность потока составляет 78%. Выполненная процедура имитационного моделирования также позволила оценить значение задержки транспортных средств, установлено, что среднее наблюдаемое значение по основному направлению (\bar{t}_0) составляет 87,57 с, по второстепенным направлениям (\bar{t}_B) – 125,9 с, что в свою очередь позволяет рассчитать значение коэффициента соотношения средних задержек (k_t):

$$k_t = \frac{\bar{t}_0}{\bar{t}_B} \quad (4)$$

где k_t – коэффициент соотношения средних задержек на рассматриваемом участке; \bar{t}_0 – средняя задержка при движении по основному (координируемому) участку, с; \bar{t}_B – средняя задержка при движении по второстепенным (не координируемым) участкам, с.

Выполненный расчет с использованием формулы (4) позволил установить значение коэффициента 0,7, при котором, согласно требованиям, описанным в главе 1 с обеспеченной транзитностью координируемого участка в 70%, управление считается эффективным.

Несмотря на наблюдаемые значительные задержки по второстепенным улицам, которые превышают простои на основном направлении более чем на 40%, в соответствии с интенсивностью, превышающей в 4 раза, такое значение является допустимым, но как было установлено ранее, в современных городах довольно часто наблюдаются ситуации, при которых значение интенсивностей второстепенных улиц равнозначно или превышает значение интенсивности по основному направлению. При возникновении таких ситуаций, требуется оперативное вмешательство со стороны управляющих организаций, в введении которых находятся такие координируемые участки.

Для разработки математического аппарата и усовершенствования ранее разработанного алгоритма в рамках главы 3 выполнен ряд имитационных экспериментов, целью которых является установлении определенных ранее коэффициентов – k_N и k_t для определения эффективности применения координируемого управления.

В результате выполнения экспериментов, были установлены соотношения введенных коэффициентов (табл. 4).

Из таблицы видно, что при изменении интенсивности, значения коэффициентов соотношения задержек изменяется не значительно в пределе от 0,61 до 0,69, с использованием пакета «Описательная статистика» был выполнен анализ каждого рассмотренного коэффициента, что наглядно представлено в таблице 5.

Таблица 4 – Соответствие значений коэффициентов соотношений интенсивностей и задержек на координированном участке по результату имитационного моделирования

№ п/п	k_N	k_t
1	0,22	0,69
2	0,33	0,62
3	0,44	0,61
4	0,55	0,62
5	0,66	0,61

Таблица 5 – Результаты математического анализа полученных коэффициентов

Математические величины для анализа k_N	Значения	Математические величины для анализа k_t	Значения
Среднее	0,44	Среднее	0,63
Стандартная ошибка	0,077782	Стандартная ошибка	0,015166
Медиана	0,44	Медиана	0,62
Мода	-	Мода	0,62
Стандартное отклонение	0,17	Стандартное отклонение	0,03
Дисперсия выборки	0,03	Дисперсия выборки	0,001
Экцесс	-1,2	Экцесс	4,57
Асимметричность	$-1,5 \cdot 10^{-15}$	Асимметричность	2,12
Интервал	0,44	Интервал	0,08
Минимум	0,22	Минимум	0,61
Максимум	0,66	Максимум	0,69
Сумма	2,2	Сумма	3,15
Счет	5	Счет	5
Уровень надежности (95,0%)	0,22	Уровень надежности (95,0%)	0,042

По итогу выполненного анализа была получен точечный график, отражающий зависимость между установленными коэффициентами – интенсивности и задержки, наглядно представленный на рисунке 9.

Графический анализ полученных зависимостей с использованием общеизвестных функций, позволил установить величину аппроксимации и получить уравнение определенных функций – линейной, экспоненциальной, логарифмической и полиномиальной (табл. 8).

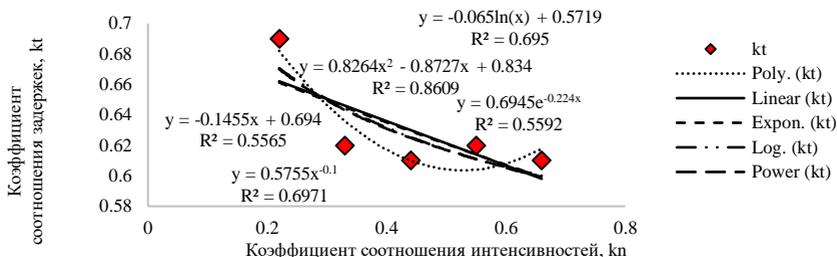


Рисунок 9 – Точечный график зависимости значений коэффициентов соотношений интенсивностей и задержек на координированном участке по результату имитационного моделирования

Таблица 8 – Результаты графического анализа установленных зависимостей

№ п/п	Наименование функциональной зависимости	Уравнение	Величина аппроксимации
1	Линейная	$y = -0,1455x + 0,694$	$R^2 = 0,56$
2	Логарифмическая	$y = -0,065\ln(x) + 0,5719$	$R^2 = 0,7$
3	Полиномиальная	$y = 0,8264x^2 - 0,8727x + 0,834$	$R^2 = 0,87$
4	Степенная	$y = 0,5755x^{-0,1}$	$R^2 = 0,7$
5	Экспоненциальная	$y = 0,6945e^{-0,224x}$	$R^2 = 0,56$

Установлено, что наиболее точно описать полученные распределения позволяет полином второй степени, таким образом, между установленными коэффициентами с достоверностью 87% получена функциональная зависимость, описываемая следующим уравнением:

$$k_t = 0,8264 \cdot k_N^2 - 0,8727 \cdot k_N + 0,834 \quad (5)$$

или

$$\bar{t}_0 / \bar{t}_B = 0,8264 \cdot \left(\frac{\bar{N}_B}{\bar{N}_0} \right)^2 - 0,8727 \cdot \frac{\bar{N}_B}{\bar{N}_0} + 0,834 \quad (6)$$

где k_N – коэффициент соотношения интенсивностей дорожного движения; \bar{N}_0 – средняя интенсивность движения по основному (координируемому) участку, ед/ч; \bar{N}_B – средняя интенсивность движения по второстепенным (не координируемым) участкам, ед/ч; k_t – коэффициент соотношения средних задержек на рассматриваемом участке; \bar{t}_0 – средняя задержка при движении по основному (координируемому) участку, с; \bar{t}_B – средняя задержка при движении по второстепенным (не координируемым) участкам, с.

Таким образом, зная соотношение интенсивностей при координированном управлении возможно определить соотношение задержек автомобилей и осуществить анализ коэффициента эффективности координированного управления ($k_{эку}$) соответствующий значению k_t :

$$k_{эку} = k_t, \quad (7)$$

были определены условия эффективного применения координированного управления рассматриваемого участка:

$$k_{\text{эку}} < 1, \quad (8)$$

и не эффективного:

$$k_{\text{эку}} > 1. \quad (9)$$

В результате расчета получена графическая зависимость, которая будет иметь вид, представленный на рис. 10, где «область 1» обозначена область, при которой эффективно применение координированного управления, что соответствует ранее установленным требованиям по вводу такого типа организации принудительного управления; «область 2» также является эффективной в связи с тем, что значение коэффициента эффективности управления в данном случае не превышает 1, в виду того что среднее время задержки наблюдаемое на второстепенных улицах все еще не превышает время задержки на основной (координируемой магистрали); «область 3» наглядно отражает условия при которых применение координации является неэффективным.



Рисунок 10 – Графическое изображение полученных результатов применительно к оценке эффективности координированного управления

Полученные результаты позволили разработать алгоритм оценки эффективности координированного управления (рис. 11).

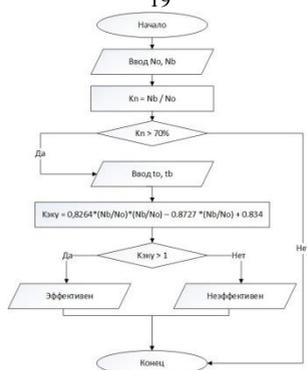


Рисунок 11 – Алгоритм принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления

Для оценки эффективности полученных результатов в главе четыре «Практическая реализация и оценка эколого-экономических показателей полученных результатов» произведена проверка эффективности координированного типа управления на исследуемых магистральных улицах и определены временные периоды применения жесткого не связного типа управления (табл. 9, табл. 10)

Таблица 9 – Результаты применения алгоритма оценки эффективности координированного управления на магистральной ул. 40 лет Октября в г.

Павловск

Время \ День недели	00:00-05:00	05:00-07:00	07:00-11:00	11:00-14:00	14:00-17:00	17:00-19:00	19:00-22:00	22:00-00:00
Понедельник	КНЭ*	КНЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*
Вторник	КНЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*
Среда	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*	КНЭ*
Четверг	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*
Пятница	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КНЭ*
Суббота	КНЭ*	КНЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КНЭ*	КНЭ*
Воскресенье	КНЭ*	КНЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КНЭ*	КНЭ*

*КНЭ – координация неэффективна; КЭ – координация эффективна

Таблица 10 – Результаты применения алгоритма оценки эффективности координированного управления на магистральной ул. Пролетарской в г.

Россошь

Время \ День недели	00:00-06:00	06:00-09:00	09:00-12:00	12:00-15:00	15:00-18:00	18:00-20:00	20:00-22:00	22:00-00:00
Понедельник	КНЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КНЭ*
Вторник	КНЭ*	КНЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КНЭ*
Среда	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КНЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*
Четверг	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*	КНЭ*
Пятница	КНЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*	КНЭ*
Суббота	КНЭ*	КНЭ*	КЭ*	КЭ*	КНЭ*	КЭ*	КНЭ*	КНЭ*
Воскресенье	КНЭ*	КНЭ*	КЭ*	КНЭ*	КНЭ*	КЭ*	КНЭ*	КНЭ*

*КНЭ – координация неэффективна; КЭ – координация эффективна

По результату анализа изменения средней величины задержки было установлено, что на объектах исследования в результате применения алгоритма (рис. 11) и использования рекомендуемых периодов времени для работы координированного управления и жесткого управления в течении недели (табл. 9, табл. 10) возможно в целом улучшить транспортную ситуацию, снизив задержку на 15% и 18% соответственно на объекте исследования в г. Павловск и г. Россошь (рис. 12).



Рисунок 12 – Гистограмма изменения средней величины задержки в результате оценки эффективности координированного управления и установления периодов неэффективного применения

Снижение величины задержки, позволило сократить расход топлива на исследуемых магистральных улицах, для первой исследуемой магистральной улицы, расположенной в г. Павловск, годовая экономия топлива в денежном эквиваленте, составила 570 312,5 рублей, для второй исследуемой магистральной улицы, расположенной в г. Россошь, экономия в денежном эквиваленте составила 771 062,5 рублей. В совокупности годовой экономический эффект составил 1 341 375 рублей. Также следует отметить, что по результату снижения расхода топлива, который в среднем на исследуемых магистральных улицах составил 294 литр/ч, происходит снижение вредных выбросов в атмосферу, что повышает экологичность в результате принятых мероприятий в области управления транспортными потоками. В совокупности концентрация вредных выбросов на исследуемых магистральных улицах снизится на 2,434 т/год (табл. 11).

Таблица 11 – Оценка изменения концентрации вредных выбросов на исследуемых магистральных улицах

Расположение объектов исследования	Δ оксид углерода, т/г	Δ углеводород, т/г	Δ оксид азота т/г	Δ диоксид серы, т/г
г. Павловск	0,74	0,082	0,2	0,018
г. Россошь	0,99	0,11	0,27	0,024
Σ		2,434		

В результате практической реализации результатов исследования были получены новые режимы работы светофорных объектов, расположенных на исследуемых магистральных улицах в г. Павловск и г. Россось, позволяющие эффективно управлять движением транспортных потоков. Произведенная эколого-экономическая оценка позволила определить, что применение разработанного алгоритма способствует снижению средней величины задержки транспортных средств на 16%, расхода топлива, оцененного в денежном эквиваленте на 1 341 375 рублей и концентрации вредных выбросов на 2,434 т/г, что подтверждает экологическую и экономическую эффективность от практической реализации полученных в ходе исследования результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача, направленная на повышение безопасности дорожного движения и снижение потери времени участников дорожного движения путем оценки эффективности применения согласованного типа управления регулируемых перекрестков и имеющая существенное значение для эксплуатации автомобильного транспорта и развития страны в целом.

Основные результаты и выводы

1. Выполнен анализ основных методов и условий ввода согласованного типа управления регулируемых перекрестков, установлено, что в большинстве малых и средних городов отсутствует возможность постоянного мониторинга транспортной ситуации, что не позволяет оперативно изменять режимы управления. В таком случае необходимо применением ресурсов имеющегося оборудования и разработки новых методов управления, основанных на изменении характеристик транспортных потоков, как на основных магистральных улицах, так и на второстепенных.

2. В результате исследований УДС Воронежской области – г. Павловск и г. Россось, определено, что на связных направлениях координированного участка, средние, минимальные и максимальные значения измеряемого параметра при существующем цикле управления является значительно высоким в сравнении с аналогичными показателями по магистральной улице:

- средние значения по направлениям связующих участков варьируются в пределе $\bar{t} \in [497,07; 1180,19]$, по направлениям магистральной улицы $\bar{t} \in [87,16; 275,48]$;

- минимальные значения по направлениям связующих участков варьируются в пределе $t_{min} \in [90,26; 121,77]$, по направлениям магистральной улицы $t_{min} \in [13,32; 22,12]$;

- максимальные значения по направлениям связующих участков варьируются в пределе $t_{max} \in [1023,43; 1237,21]$, по направлениям магистральной улицы $t_{max} \in [165,92; 2094,83]$.

3. Усовершенствованы условия ввода согласованного типа управления транспортными потоками на регулируемых перекрестках с применением показателей – интенсивности и задержки, определенными соответствующими коэффициентами k_N и k_t .

4. Установлена функциональная зависимость между определенными коэффициентами k_N и k_t , позволяющая с достоверностью 87% оценить значение задержек транспортных средств на магистральной улице и прилегающих участках.

5. Разработан алгоритм принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления с использованием установленных зависимостей между основными показателями транспортного потока – интенсивности и задержки.

6. В результате практической реализации результатов исследования были получены новые режимы работы светофорных объектов, расположенных на исследуемых магистральных улицах в г. Павловск и г. Россошь, позволяющие эффективно управлять движением транспортных потоков. Произведенная эколого-экономическая оценка позволила определить, что применение разработанного алгоритма способствует снижению средней величины задержки транспортных средств на 16%, расхода топлива, оцененного в денежном эквиваленте на 1 341 375 рублей и концентрации вредных выбросов на 2,434 т/г, что подтверждает экологическую и экономическую эффективность от практической реализации полученных в ходе исследования результатов.

Перспективы дальнейшей разработки темы: усовершенствование существующих способов организации движения в городских системах автоматизированного управления и повышения эффективности функционирования УДС.

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций (ВАК)

1. Артемов, А.Ю. Способ оценки эффективности работы координированного типа управления на магистральной улице / Дорохин С.В., Артемов А.Ю. // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 586-599.

2. Артемов, А.Ю. Исследование управления транспортными потоками на магистральной улице в г. Павловск / Артемов А.Ю. // Воронежский научно-технический Вестник. 2023. Т. 1. № 1 (43). С. 107-116.

3. Артемов, А.Ю. Развитие методов управления транспортными потоками в малых и средних городах / Дорохин С.В., Артемов А.Ю. // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 1-1 (80). С. 60-67.

4. Артемов, А.Ю. Разработка алгоритма оценки эффективности координированного управления / Артемов А.Ю., Дорохин С.В. // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 4-2 (79). С. 88-94.

5. Артемов, А.Ю. Оценка эффективности работы координируемого участка / Дорохин С.В., Артемов А.Ю. // Воронежский научно-технический Вестник. 2022. Т. 2. № 2 (40). С. 64-73.

6. Артемов, А.Ю. Моделирование процесса движения на магистральной улице г. Воронеж в программной среде Anylogic / Дорохин С.В., Лихачев Д.В., Артемов А.Ю., Марусин А.В. // Воронежский научно-технический Вестник. 2022. Т. 4. № 4 (42). С. 73-84.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus и Web of Science

7. Artemov, A.Y. Development of a method for evaluation of the efficiency of the coordinated type of management as referred to main streets / Dorokhin, S., Ivannikov, V., Likhachev, D., Artemov, A. // E3S Web of Conferences, 2023, 376, 04016. DOI: 10.1051/e3sconf/202337604016

8. Artemov, A.Y. The Dynamic Traffic Modelling System / Dorokhin, S., Likhachev, D., Artemov, A., ...Kulikov, A., Novikov, A. // Lecture Notes in Networks and Systemsthis link is disabled, 2022, 402 LNNS, P. 1586–1594. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_175

9. Artemov, A.Y. Study of the process of introducing coordinated management on the principle of green wave / Dorokhin, S.V., Artemov, A.Y., Gigadlo, A.P. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 971(5), 052083. DOI: 10.1088/1757-899X/971/5/052083

10. Artemov, A.Y. Traffic simulation: An analytical review / Dorokhin, S., Artemov, A., Likhachev, D., Novikov, A., Starkov, E. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 918(1), 012058. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012058

11. Artemov, A.Y. Assessment of existing methods for calculating coordination programs for traffic management / Dorokhin, S., Zelikov, V., Artemov, A., Likhachev, D. // AIP Conference Proceedings this link is disabled, 2023, 2507, 050012

12. Artemov, A.Y. Estimation of efficiency of different traffic management methods in isolated area / Drapalyuk, M., Dorokhin, S., Artemov, A. // Transportation Research Procedia this link is disabled, 2020, 50, P. 106–112 DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.013

Публикации в прочих изданиях, индексируемых в РИНЦ

13. Артемов, А.Ю. Управление транспортными потоками УДС городов / Артемов А.Ю., Дорохин С.В. // В сборнике: Проблемы и перспективы конструктивного совершенствования отечественного автомобилестроения. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Воронеж, 2023. С. 74-77.

14. Артемов, А.Ю. Состояние интеллектуальных транспортных систем в субъектах Российской Федерации / Ищенко Е.С., Артемов А.Ю., Дорохин С.В., Ширяев С.А. // В сборнике: Технология транспортных процессов:

состояние, проблемы, перспективы. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор В.А. Зеликов. Воронеж, 2023. С. 43-49.

15. Артемов, А.Ю. Обзор существующих методов расчета программ координации для управления дорожным движением / Артемов А.Ю., Дорохин С.В., Лихачев Д.В. // В сборнике: Актуальные вопросы и перспективы развития современной науки. Материалы Национальной научно-практической конференции. Отв. редактор В.А. Зеликов. Воронеж, 2022. С. 68-75.

16. Артемов, А.Ю. Анализ основных методов, применяемых в зарубежных методиках расчета светофорного цикла / Лихачев Д.В., Дорохин С.В., Артемов А.Ю. // В сборнике: Актуальные вопросы и перспективы развития современной науки. Материалы Национальной научно-практической конференции. Отв. редактор В.А. Зеликов. Воронеж, 2022. С. 53-58.

17. Артемов, А.Ю. Моделирование транспортных потоков: аналитический обзор / Артемов А.Ю., Дорохин С.В. // В сборнике: Технология транспортных процессов - настоящее и будущее. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор В.А. Зеликов. Воронеж, 2021. С. 20-26.

18. Артемов, А.Ю. Анализ показателей аварийности по Воронежской области в период с января по август 2020 года / Зеликов В.А., Струков Ю.В., Денисов Г.А., Артемов А.Ю., Сибиряткин Е.В., Золотухин С.И. // В сборнике: Проблемы социально-экономической устойчивости региона. сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2021. С. 51-56.

19. Артемов, А.Ю. Анализ основных параметров применяемых в зарубежных методиках расчета светофорного цикла / Лихачев Д.В., Дорохин С.В., Артемов А.Ю. // В сборнике: Технология транспортных процессов - настоящее и будущее. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор В.А. Зеликов. Воронеж, 2021. С. 27-31.

Артемов Александр Юрьевич

Повышение эффективности управления транспортными потоками на магистральных улицах малых и средних городов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать