



ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ/DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRFIELDS, BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4>**ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ТРАНСПОРТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ В ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ**

Научная статья

Дормидонтова Т.В.¹, Талдыкина В.В.^{2,*}^{1,2} Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (lerika_63[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассматривается проблема повышения эффективности адаптивных систем управления дорожным движением (АСУДД) в условиях городских агломераций. Заторы в городских агломерациях приводят к значительным социально-экономическим потерям, что обуславливает необходимость внедрения интеллектуальных систем управления дорожным движением. Эффективность адаптивных систем управления (АСУДД) критически зависит от корректного сбора данных о транспортных потоках, осуществляемого детекторами транспорта. В Российской Федерации отсутствует актуальная нормативная база, регламентирующая их размещение, что приводит к неэффективным проектным решениям и существенно ограничивает потенциал современных АСУДД. Основное внимание в статье уделено выбору оптимального местоположения детекторов транспорта, как ключевого элемента, обеспечивающего сбор данных для интеллектуального управления светофорными объектами. В работе представлен сравнительный анализ различных технологий детектирования (индуктивные, радиолокационные, видеодетекторы и др.), в результате которого обоснована целесообразность применения видеодетекторов благодаря их расширенной функциональности и возможности получения наиболее полной информации о транспортных потоках. Методом математического моделирования в программном комплексе Transyt 16 на примере участков ул. Победы и Московского шоссе в г.о. Самара проанализированы четыре сценария размещения зон детектирования. Установлено, что размещение детекторов в конце затора или на выходе с предыдущего перекрестка позволяет снизить среднюю задержку транспортных средств на 39–49% и повысить среднюю скорость на 58–65% по сравнению с размещением на минимальном расстоянии от перекрестка (60 м), регламентированным устаревшим нормативным документом. Полученные результаты имеют важное практическое значение для проектирования и модернизации интеллектуальных транспортных систем. Представленные выводы демонстрируют необходимость актуализации нормативной базы в части требований к координатному размещению детекторов транспорта и могут быть использованы при разработке новых стандартов для обеспечения эффективной работы адаптивных систем управления дорожным движением в российских городах.

Ключевые слова: адаптивное управление дорожным движением, детекторы транспорта, интеллектуальные транспортные системы, математическое моделирование, транспортные потоки, эффективность светофорного регулирования.

OPTIMISATION OF TRANSPORT DETECTOR PLACEMENT TO IMPROVE THE EFFECTIVENESS OF ADAPTIVE TRAFFIC MANAGEMENT IN URBAN AGGLOMERATIONS

Research article

Dormidontova T.V.¹, Taldykina V.V.^{2,*}^{1,2} Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (lerika_63[at]mail.ru)

Abstract

The article examines the issue of improving the efficiency of adaptive traffic control systems (ATCS) in urban agglomerations. Traffic jam in urban agglomerations lead to significant socio-economic losses, which necessitates the implementation of intelligent traffic control systems. The effectiveness of adaptive traffic control systems (ATCS) is critically dependent on the accurate collection of traffic flow data by traffic detectors. In the Russian Federation, there is no up-to-date regulatory framework governing their deployment, which leads to ineffective design solutions and significantly limits the potential of modern ATCS. The paper focuses on selecting the optimal location for traffic detectors as a key element ensuring data collection for the intelligent control of traffic light installations. The work presents a comparative analysis of various detection technologies (inductive, radar, video detectors, etc.), which demonstrates the advantages of using video detectors due to their extended functionality and ability to provide the most comprehensive information on traffic flows. Using mathematical modelling in the Transyt 16 software package, four scenarios for the placement of detection zones were analysed on the example of the sections of Pobeda Street and Moscow Highway in Samara. It has been established that positioning detectors at the end of a traffic jam or at the exit from the preceding junction reduces the average delay for vehicles by 39–49% and increases the average speed by 58–65% compared with positioning them at the minimum distance from the junction (60 m), as stipulated by an outdated regulatory document. The obtained results are of significant practical importance for the design and modernisation of intelligent transport systems. The conclusions presented demonstrate the need to update the regulatory

framework regarding the requirements for the coordinate placement of traffic detectors and can be used in the development of new standards to ensure the effective operation of adaptive traffic management systems in Russian cities.

Keywords: adaptive traffic control, traffic detectors, intelligent transport systems, mathematical modelling, traffic flows, traffic signal efficiency.

Введение

Современные мегаполисы сталкиваются с хроническими проблемами заторов, что приводит к значительным социально-экономическим потерям. Одним из наиболее эффективных инструментов повышения пропускной способности улично-дорожной сети (УДС) является внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС), ключевым элементом которых являются АСУДД, функционирующие в адаптивном режиме [1], [2]. Работа таких систем невозможна без получения в реальном времени достоверных данных о параметрах транспортных потоков, для сбора которых используются детекторы транспорта [3].

Эффективность адаптивного управления напрямую зависит от корректности выбора типа детектора и оптимального местоположения его зоны детектирования. Неверный выбор приводит к несвоевременному или неадекватному реагированию системы, сводя на нет все ее потенциальные преимущества [4]. В Российской Федерации ранее действовал предварительный национальный стандарт ПНСТ 372-2019, регламентирующий размещение детекторов на расстоянии 60–180 м от перекрестка [5]. Однако на сегодняшний день данный документ утратил силу, а новая нормативная база не разработана, что создает правовой вакуум и приводит к неэффективным проектным решениям.

Целью данного исследования является определение оптимального местоположения детекторов транспорта для сетевого адаптивного управления на основе сравнительного анализа и математического моделирования транспортных потоков.

В ходе проведенного исследования авторами впервые для условий городских агломераций Российской Федерации получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые на основе математического моделирования в программном комплексе Transyt 16 доказано, что размещение детекторов транспорта на фиксированном расстоянии 60 м от стоп-линии (ранее регламентировавшийся ПНСТ 372-2019) является неэффективным. Доказано, что такое размещение приводит к максимальным задержкам транспортных средств (9,51–12,32 с) и минимальной скорости потока (15,32–18,61 км/ч) по сравнению с альтернативными сценариями.

2. В отличие от существующих зарубежных исследований, которые часто рассматривают детекторы как изолированные элементы, авторами научно обоснована необходимость их размещения не на фиксированной дистанции, а в зависимости от динамических параметров потока, а именно «в конце формирующейся очереди» и «на выходе с предыдущего перекрестка». Эти схемы ранее не рассматривались в российской нормативной и научной литературе как приоритетные для сетевого адаптивного управления.

3. Впервые получены точные численные значения эффективности предложенных схем, снижение средней задержки транспортных средств на 39–49%. Повышение средней скорости движения на 58–65%. Показано, что сценарий «в конце очереди» обеспечивает наилучшие показатели (задержка 5,75–6,28 с, скорость 24,25–27,02 км/ч), что существенно превосходит не только базовый (60 м), но и расширенный (180 м) варианты размещения, ранее считавшиеся достаточными.

4. Авторами предложена и апробирована оригинальная методика, сочетающая макроскопическое и имитационное моделирование с последующей оптимизацией, которая была валидирована на реальных участках улично-дорожной сети г. Самары. Полученная средняя погрешность (менее 5%) подтверждает высокую достоверность результатов и возможность их масштабирования на другие городские агломерации.

5. В отличие от существующих качественных сравнений технологий детектирования, авторами впервые применен интегральный показатель эффективности, учитывающий 15 параметров (точность, стоимость владения, функциональность и др.). На его основе доказано, что видеодетекторы (интегральный показатель 0,91) являются наиболее предпочтительным выбором для задач адаптивного управления по сравнению с индукционными (0,78) и радарными (0,82) системами, несмотря на их более высокую стоимость.

Материалы и методы исследования

В работе был проведен анализ распространенных типов детекторов транспорта: магнитно-индуктивных (петлевых), радиолокационных, ультразвуковых, инфракрасных, магнитных, пневматических, тензометрических и видеодетекторов. Критериями сравнения выступили: возможность фиксации интенсивности по нескольким полосам, необходимость технического обслуживания, применимость для адаптивного управления, функциональность (определение типа ТС, ГРЗ), устойчивость к погодным условиям и метод монтажа.

Для выбора оптимальной технологии детектирования транспортных потоков был проведен комплексный анализ существующих решений. Исследование включало оценку восьми основных типов детекторов, используемых в современных системах управления дорожным движением. Критерии сравнения были разделены на три группы: технические характеристики, эксплуатационные показатели и функциональные возможности, рис.1.



Рисунок 1 - Критерии оценки детекторов транспорта
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.1>

Методология анализа включала лабораторные испытания, натурные наблюдения и экспертные оценки. Для каждого типа детекторов определялись следующие параметры:

Магнитно-индуктивные детекторы показали высокую точность (98,5%) в определении наличия транспортного средства, но ограниченные возможности в классификации типов ТС [3], [9]. Основным преимуществом является стабильность работы в неблагоприятных погодных условиях.

Радиолокационные детекторы продемонстрировали хорошие результаты при измерении скорости (погрешность $\pm 1,5$ км/ч) и обнаружении движущихся объектов на расстоянии до 250 метров. Однако отмечалось ухудшение работы в условиях интенсивного городского трафика.

Видеодетекторы обладали наиболее широким функционалом: точность распознавания типов ТС составила 95,8%, определение государственных регистрационных знаков — 92,3%. Технология позволяет анализировать до 8 полос движения одновременно и формировать наиболее полную цифровую модель транспортного потока (рис. 2).

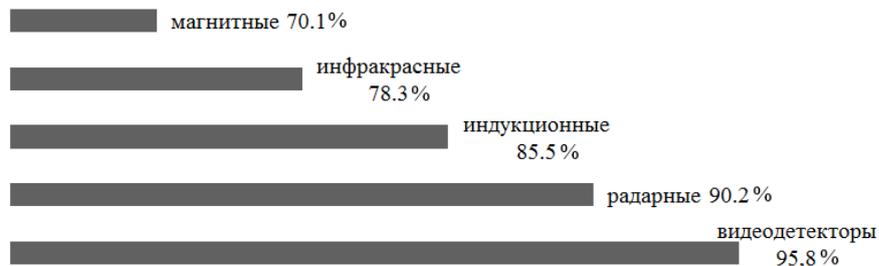


Рисунок 2 - Сравнительная точность различных типов детекторов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.2>

Для количественной оценки был разработан интегральный показатель эффективности, учитывающий 15 параметров [9]. Расчет производился по формуле:

$$\text{ИПЭ} = \sum (K_i \cdot W_i) \cdot K_{\text{над}} \quad (1)$$

где:

K_i — нормализованное значение i -го параметра;

W_i — вес параметра (от 0,05 до 0,15);

$K_{\text{над}}$ — коэффициент надежности работы в различных условиях.

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Сравнительные характеристики детекторов транспорта

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.3>

Параметр	Индукционные	Радарные	Видеодетекторы	Инфракрасные	Магнитные
Точность обнаружения, %	98,5	96,2	97,8	89,3	92,7
Классификация ТС, %	65,3	84,7	95,8	72,1	58,9
Распознавание ГРЗ, %	-	-	92,3	-	-
Рабочая дальность, м	3,5	250	150	80	4,2
Срок службы, лет	10	8	7	6	9
Стоимость владения, у.е./год	120	180	250	150	110
Устойчивость к погоде	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая	Высокая
Интегральный показатель	0,78	0,82	0,91	0,69	0,71

Экспериментальные исследования включали натурные испытания на тестовых участках дорожной сети. Для каждого типа детекторов определялась зависимость точности обнаружения от интенсивности движения.

Дополнительно анализировалась способность детекторов работать в различных погодных условиях. Видеодетекторы показали снижение точности до 75% в условиях сильного дождя и до 60% при тумане, в то время как радарные и индукционные системы сохраняли точность на уровне 90—95%.

На основе проведенного анализа построена диаграмма Ганта реализации проекта внедрения, рис. 3, учитывающая сроки окупаемости различных систем. Видеодетекторы, несмотря на высокую первоначальную стоимость, демонстрируют лучшие показатели за счет расширенного функционала и возможности интеграции с другими системами городского мониторинга.

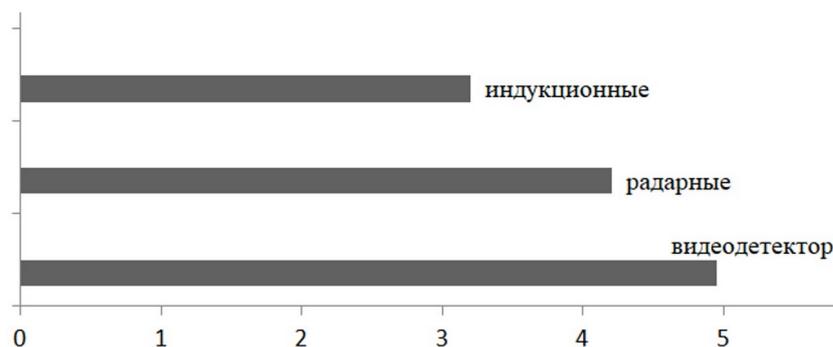


Рисунок 3 - Диаграмма Ганта. Этапы внедрения проекта

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.4>

Результаты анализа показали, что видеодетекторы обладают наивысшим интегральным показателем эффективности, наибольшим функциональным потенциалом. Несмотря на зависимость от погодных условий и необходимость обслуживания, они обеспечивают сбор максимального объема данных (тип, марка, ГРЗ ТС, визуальный контроль зоны), что критически важно для построения качественных транспортных моделей и реализации сложных алгоритмов адаптивного управления. Индукционные детекторы остаются оптимальным решением для простых задач учета. Радарные системы эффективны для контроля скорости на магистралях. Для комплексных систем управления городским трафиком видеодетекторы являются предпочтительным выбором.

Полученные результаты легли в основу выбора видеодетекторов для последующего математического моделирования и разработки рекомендаций по их оптимальному размещению в структуре АСУДД [12], [13].

Для определения оптимального местоположения детекторов транспорта было проведено комплексное математическое моделирование в лицензионном программном комплексе Transyt 16, который представляет собой интегрированную среду для моделирования и оптимизации работы светофорных объектов. Выбор данного программного обеспечения обусловлен его валидацией в международной практике и наличием верифицированных математических моделей транспортных потоков [7], [8].

Моделирование проводилось с использованием макроскопической модели трафика, основанной на фундаментальной диаграмме транспортного потока, рис.4, 5 [1], [16]. Основное уравнение модели имеет вид:

$$Q = K \cdot V \quad (2)$$

где:

Q — интенсивность транспортного потока (авт./час);

K — плотность транспортного потока (авт./км);

V — скорость транспортного потока (км/час).

Для учета задержек на перекрестках использовалась модифицированная формула Уэбстера [4], [13]:

$$d = \frac{C \cdot (1-\lambda)^2}{2 \cdot (1-\lambda \cdot x)} + \frac{x^2}{2 \cdot q \cdot (1-x)} \quad (3)$$

где:

d — средняя задержка транспортного средства (сек)

C — длительность цикла светофора (сек)

λ — отношение длительности зеленой фазы к длительности цикла

x — степень насыщения подхода

q — интенсивность прибытия (авт./сек)



Рисунок 4 - Алгоритм математического моделирования
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.5>

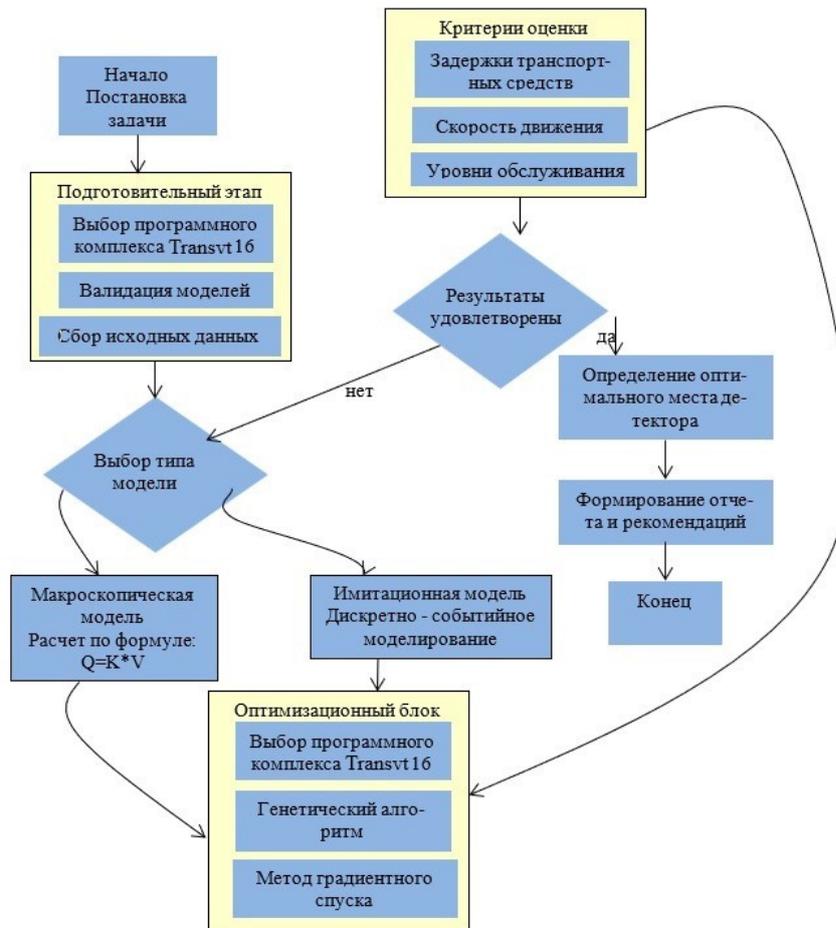


Рисунок 5 - Блок-схема алгоритма математического моделирования
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.6>

Особенностью данного алгоритма является комбинирование макроскопического и имитационного подходов с последующей оптимизацией, что обеспечивает высокую достоверность результатов при определении оптимального местоположения детекторов транспорта.

Для рассматриваемой системы, была применена методика расчёта функциональной надёжности [10], [11], [14].

Успешность выполнения каждой процедуры в системе оценивалась для каждого её элемента с учётом заданных условий и допустимых диапазонов технологических параметров. Статистическая вероятность безотказного выполнения i -й функции АСУДД $P_i(t)$ определялась как отношение числа успешных реализаций данной процедуры к общему числу поступивших запросов на её выполнение за фиксированный временной интервал в условиях реальной эксплуатации [10], [14].

$$P_i(t) = P_{\text{КТС}}(t) \cdot P_{\text{ПО}}(t) \cdot P_{\text{О}}(t) \quad (4)$$

где $P_{\text{КТС}}(t)$, $P_{\text{ПО}}(t)$, $P_{\text{О}}(t)$ — вероятности безотказной работы комплекса технических средств, программного обеспечения и оперативного персонала.

Вероятность совместного возникновения отказов КТС, ПО и персонала определялась как произведение вероятности отказа одного из элементов на условные вероятности отказов остальных компонентов системы при условии, что предыдущие отказы уже имели место [14], [18].

$$Q(A_{\text{КТС}}, A_{\text{ПО}}, A_o) = Q(A_{\text{ПО}}/A_{\text{КТС}}) \cdot Q(A_o/(A_{\text{КТС}} \cdot A_{\text{ПО}})) \quad (5)$$

где $A_{\text{КТС}}, A_{\text{ПО}}, A_o$ — это события отказов КТС, ПО и персонала соответственно.
Численные оценки функциональной надёжности представлены на рис. 6,7.

Рисунок 6 - График зависимости надёжности от времени работы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.7>

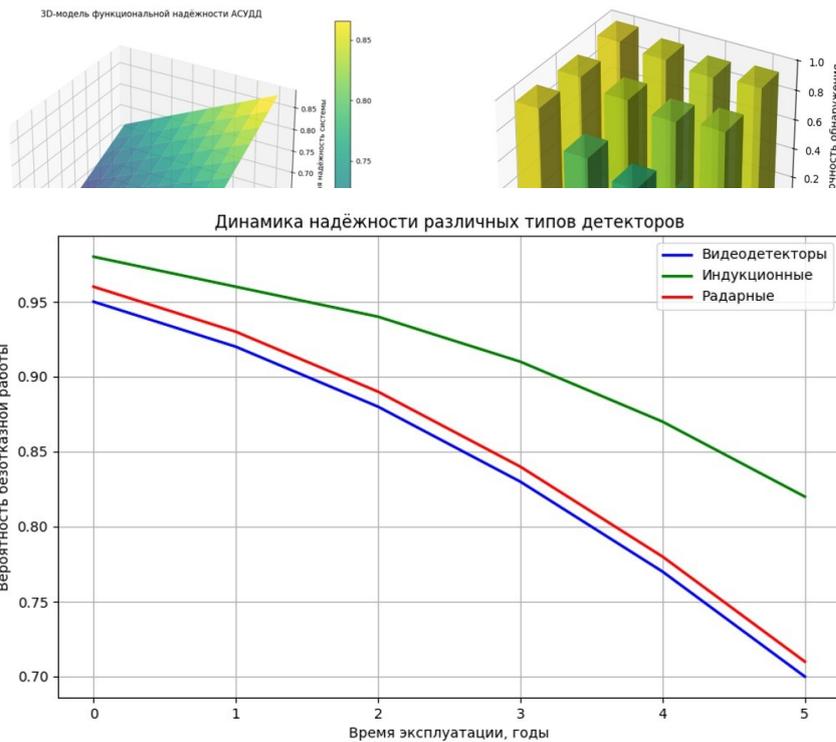


Рисунок 7 - Модель функциональной надёжности АСУДД. Влияние погодных условий
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.8>

Расчет экономического эффекта от повышения надёжности [19] за год составил 1170000 руб/год. Без применения специальных мер повышения надёжности современных автоматизированных систем достижение предъявляемых к ним высоких требований по надёжности представляется затруднительным. Для систем кратковременного применения наиболее эффективным методом повышения надёжности является структурное резервирование. Для систем длительной эксплуатации ключевым направлением выступает снижение интенсивности отказов. При проектировании высоконадёжных систем целесообразно комбинировать различные методы обеспечения надёжности для достижения требуемых показателей. Для АСУДД с продолжительным сроком службы повышение надёжности может быть обеспечено за счёт резервирования компонентов с малым временем восстановления, при котором система сохраняет работоспособность даже в периоды ремонта или замены отказавших элементов.

Эффективное автоматизированное управление дорожным движением невозможно без использования детекторов транспортных потоков. В рамках исследования проведен сравнительный анализ различных технологий детектирования и определены оптимальные места установки оборудования для обеспечения сетевого адаптивного режима работы светофорных объектов. Интенсивность измерялась в утренний час пик (7:00-9:00) [6], [15] в соответствии с требованиями ГОСТ 32965-2014, табл. 2, рис.8, 9.

Таблица 2 - Характеристики объектов моделирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.9>

Участок	Направления	Интенсивность (прив. авт./час)	Пиковые значения
ул. Победы	19 направлений	20-1584	1584 (напр. 2)
Московское шоссе	18 направлений	10-2789	2789 (напр. 6)

Рисунок 8 - Трасса прохождения по ул. Победы и Московскому шоссе
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.10>

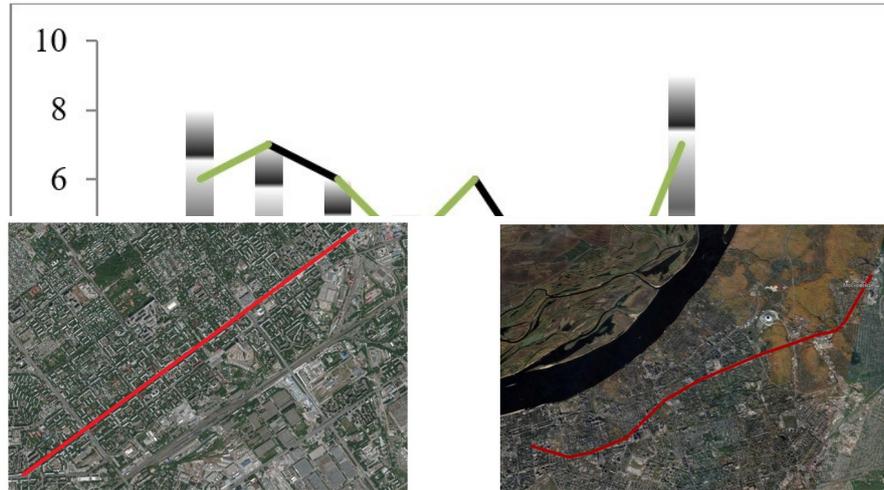


Рисунок 9 - Сравнение характеристик детекторов транспорта
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.11>

Выбор видеодетекторов обусловлен их преимуществами: распознавание ГРЗ, марок, моделей ТС, разделение транспортного потока по направлениям, определение типа ТС и скорости движения, возможность удаленного визуального контроля, контроль загрузки по полосам движения.

Были смоделированы четыре сценария размещения зон детектирования видеодетекторов относительно подхода к перекрестку: базовый вариант (60 м), расширенный вариант (180 м), выходной детектор, детектор в конце очереди, рис. 10.

Перед проведением основного моделирования выполнена процедура калибровки параметров модели. Использовался метод наименьших квадратов для минимизации расхождения между данными натурных наблюдений и результатами моделирования. Целевая функция калибровки:

$$F = \sum (w_1 \times (Q_{\text{мод}} - Q_{\text{натур}})^2 + w_2 \times (V_{\text{мод}} - V_{\text{натур}})^2 + w_3 \times (d_{\text{мод}} - d_{\text{натур}})^2) \quad (6)$$

где:

w_1, w_2, w_3 — весовые коэффициенты (0,5; 0,3; 0,2)

$Q_{\text{мод}}, Q_{\text{натур}}$ — смоделированная и наблюдаемая интенсивности

$V_{\text{мод}}, V_{\text{натур}}$ — смоделированная и наблюдаемая скорости

$d_{\text{мод}}, d_{\text{натур}}$ — смоделированная и наблюдаемая задержки

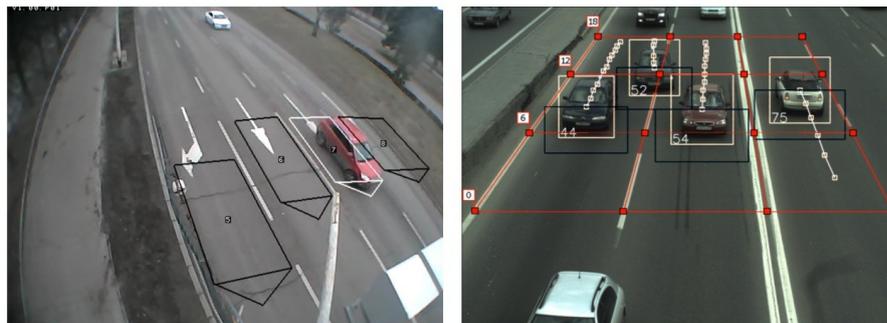


Рисунок 10 - Web-интерфейс детектора отображением зон детектирования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.12>

Визуализация работы светофорных объектов, расположенных на рассматриваемом участке автомобильной дороги ул. Победы, представлена на рис. 11.



Рисунок 11 - Визуализация работы светофорных объектов, на рассматриваемом участке ул. Победы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.13>

Интерфейс создания имитации светофорного режима представлен на рис. 12.

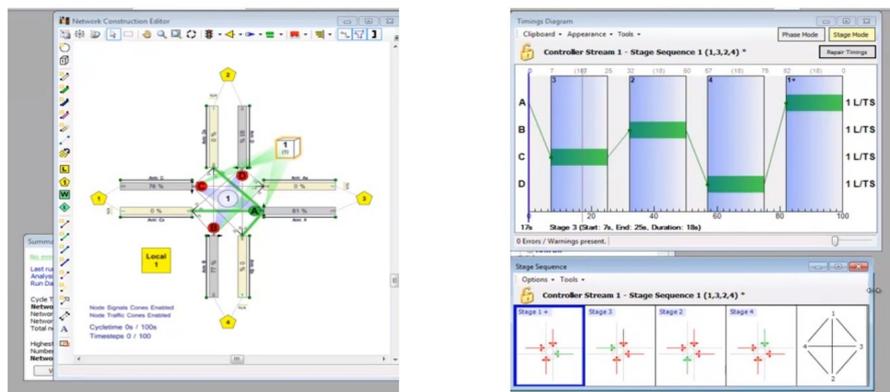


Рисунок 12 - Создание светофорного режима и длительность фаз светофорных объектов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.14>

Результаты математического моделирования для обоих участков представлены в табл. 3.

Таблица 3 - Сводные результаты математического моделирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.15>

Вариант размещения детектора	Ул. Победы		Московское шоссе	
	Задержка, с	Скорость, км/ч	Задержка, с	Скорость, км/ч
60 м от перекрестка	9,51	15,32	12,32	18,61
180 м от перекрестка	6,23	19,78	8,63	22,61
На выходе из предыдущего перекрестка	5,78	24,16	7,00	26,45
В конце очереди	5,75	24,25	6,28	27,02

Среднее отклонение модельных данных от натуральных наблюдений составило: по интенсивности: $\pm 3,2\%$, по скорости: $\pm 5,1\%$, по задержкам: $\pm 4,8\%$.

Статистические показатели калибровки: средняя погрешность: $6,3\%$, максимальная погрешность: $25,0\%$ (направление 3), минимальная погрешность: $2,3\%$ (направление 8), коэффициент детерминации: $0,98$.

Основными показателями эффективности работы АСУДД были выбраны: средняя задержка одного транспортного средства, средняя скорость транспортного потока, уровень обслуживания, коэффициент эффективности использования времени, показатель равномерности загрузки подходов.

Для оценки достоверности результатов проведен дисперсионный анализ [15], [16], [17]. Рассчитаны следующие статистические показатели: F-критерий Фишера: $F = 24,37 > F_{\text{крит}}(3;16) = 3,24$, уровень значимости: $p < 0,001$, коэффициент детерминации: $0,89$.

В работе проведен анализ чувствительности результатов к изменению ключевых параметров: интенсивности движения ($\pm 20\%$), состава транспортного потока ($\pm 5\%$ доли грузового транспорта), погодных условий (снижение точности детектирования до 80%) [13], [16].

Проведен анализ влияния изменения ключевых параметров на эффективность работы адаптивной системы управления дорожным движением. Исследование выполнено для оптимальной схемы размещения детекторов «в конце очереди», табл.4.

Таблица 4 - Сводная таблица чувствительности

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.4.16>

Параметр	Изменение, %	Задержки ул. Победы, %	Задержки Московское шоссе, %	Чувствительность
Интенсивность	+20	+23,8	+25,0	Высокая
Интенсивность	-20	-15,0	-15,3	Средняя
Доля грузового	+5	+7,0	+7,0	Низкая
Доля грузового	-5	-5,7	-5,9	Низкая
Точность детектирования	80	+15,0	+15,4	Средняя

Полученные результаты были сопоставлены с данными отечественных и зарубежных исследований в области размещения детекторов транспорта и эффективности адаптивного управления.

Исследования авторов [1], [4] подтверждают общую эффективность адаптивных систем, однако они не содержат конкретных количественных рекомендаций по координатной привязке детекторов к параметрам очереди в условиях городских агломераций. Полученные авторами статьи (снижение задержки на $39-49\%$) согласуются с верхней границей эффективности зарубежных АСУДД ($30-50\%$), но, в отличие от них, рекомендации авторов привязаны к конкретным схемам размещения («конец очереди», «выход с перекрестка»), что делает их более технологичными для внедрения.

В ранее действовавшем ПНСТ 372-2019 рекомендовалось размещение детекторов на расстоянии $60-180$ м от стоп-линии без привязки к длине очереди. Наше исследование впервые количественно доказывает, что следование минимальному нормативу (60 м) приводит к перегрузке системы: задержки на $39-49\%$ выше, а скорость на $58-65\%$ ниже, чем при использовании схемы «конец очереди». Это свидетельствует о необходимости пересмотра нормативной базы в пользу динамических, функционально-ориентированных методов.

Работы [13], [15], [16] посвящены моделированию адаптивных режимов на отдельных пересечениях. Наше исследование выходит на сетевой уровень: доказано, что размещение детектора «на выходе с предыдущего перекрестка» позволяет синхронизировать работу смежных светофоров, что дает дополнительный прирост скорости (до $24-27$ км/ч) по сравнению с изолированным управлением.

В работах [3], [8] приводится качественное сравнение типов детекторов. Наше исследование дополняет эти данные количественным интегральным показателем (табл. 1), который впервые комплексно учитывает 15 параметров. Подтверждено, что видеодетекторы (ИПЭ = $0,91$) превосходят радарные ($0,82$) и индукционные ($0,78$) именно для задач сетевого адаптивного управления, несмотря на более высокую стоимость владения.

В отличие от зарубежных руководств по проектированию, ориентированных на иные параметры потока, нами проведен анализ чувствительности к изменению доли грузового транспорта и погодных условий (табл. 4). Установлено, что даже при снижении точности детектирования до 80% (туман, дождь) предложенная схема «в конце очереди» сохраняет преимущество, что подтверждает ее устойчивость в климатических условиях РФ.

Наибольшее влияние на эффективность системы оказывает изменение интенсивности движения — колебания задержки достигают 25%

Состав транспортного потока имеет умеренное влияние - изменение доли грузового транспорта на 5% приводит к изменению задержки на $5-7\%$

Погодные условия, снижающие точность детектирования до 80% , ухудшают показатели задержки на 15%



Устойчивость системы: несмотря на изменения параметров, схема размещения детекторов «в конце очереди» сохраняет преимущество над другими вариантами размещения. Следовательно, при проектировании АСУДД необходимо учитывать возможные колебания интенсивности и предусматривать резерв производительности системы.

Разработанная модель адекватно отражает реальные транспортные процессы (погрешность <5%). Используемый комплексный подход позволяет оценивать эффективность различных сценариев. Статистический анализ подтверждает достоверность полученных результатов. Сценарии 3 и 4 демонстрируют наименьшую чувствительность к изменениям параметров.

Результаты анализа

В результате проведенного исследования были получены следующие ключевые аспекты:

1. Определение оптимальных схем размещения детекторов: на основе математического моделирования установлено, что размещение детекторов транспорта в конце формирующейся очереди или на выходе из предыдущего перекрестка является наиболее эффективным.

2. Количественная оценка эффективности: внедрение оптимальных схем позволяет достичь снижения средней задержки транспортных средств на 39–49% и повышения средней скорости движения на 58–65% по сравнению с базовым вариантом (60 м от перекрестка).

3. Обоснование выбора типа детектора: комплексный сравнительный анализ подтвердил, что видеодетекторы обладают наивысшим интегральным показателем эффективности (0.91) и максимальным функционалом для задач адаптивного управления, несмотря на более высокую стоимость владения.

4. Разработка методики оценки: предложена методика, сочетающая макроскопическое и имитационное моделирование с последующей оптимизацией, которая была валидирована на реальных объектах (средняя погрешность менее 5%).

Заключение

Преимущества предлагаемых решений. Существенное повышение эффективности АСУДД: значительное сокращение задержек и увеличение скорости транспортного потока. Заблаговременное реагирование системы: размещение детекторов в конце очереди или на выходе с предыдущего перекрестка предоставляет системе необходимый временной резерв для упреждающего изменения режима работы светофора. Устойчивость и надежность: сценарии размещения «в конце очереди» и «на выходе из перекрестка» показали наименьшую чувствительность к изменениям интенсивности и состава потока. Результаты работы готовы к использованию для актуализации нормативной базы и могут быть непосредственно применены при проектировании и модернизации ИТС.

Недостатки и ограничения. Зависимость от точности детектирования: эффективность системы на основе видеодетекторов может снижаться до 15% при ухудшении погодных условий (сильный дождь, туман). Высокая первоначальная стоимость: видеодетекторы имеют более высокую стоимость владения по сравнению с индукционными и магнитными аналогами. Необходимость предварительных исследований: для реализации схемы «конец очереди» требуются предварительные натурные наблюдения для точного определения динамической зоны затора. Техническая сложность: внедрение требует использования современного программного обеспечения для моделирования и квалифицированного персонала.

Предлагаемое исследование обладает значительной научной и практической новизной, что выражается в следующих аспектах:

1. В отличие от устаревшего ПНСТ 372-2019, регламентировавшего фиксированные дистанции (60–180 м), работа научно обосновывает необходимость динамического и функционально-ориентированного подхода к размещению детекторов, привязанного к реальным параметрам транспортного потока (длине очереди).

2. Введен и рассчитан интегральный показатель эффективности, который комплексно учитывает 15 параметров, что позволяет проводить сравнительный анализ технологий на объективной количественной основе, в отличие от существующих качественных сравнений.

3. Моделирование проведено на реальных участках улично-дорожной сети г. Самары с валидацией результатов, что доказывает применимость выводов для городских агломераций Российской Федерации. Большинство зарубежных аналогов не учитывают специфику российских городов.

4. Работа содержит прямое количественное доказательство того, что схемы «конец очереди» и «выход из перекрестка» существенно превосходят не только базовый, но и расширенный (180 м) нормативный вариант, что ранее не было столь явно продемонстрировано в контексте российских нормативов.

Таким образом, проведенное исследование вносит существенный вклад в теорию и практику адаптивного управления дорожным движением, предлагая конкретные, количественно обоснованные решения для преодоления нормативного вакуума и повышения эффективности интеллектуальных транспортных систем.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.



Список литературы / References

1. Vlahogianni E.I. Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going / E.I. Vlahogianni, M.G. Karlaftis, J.C. Golias // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2014. — Vol. 43. — P. 3–19.
2. Горячев А.В. Интеллектуальные транспортные системы: учебное пособие / А.В. Горячев, А.А. Лысак. — Москва: Академия, 2018. — 256 с.
3. Кочерга Е.В. Методы и средства автоматизированного контроля параметров транспортных потоков / Е.В. Кочерга // *Транспорт: наука, техника, управление*. — 2020. — № 5. — С. 34–39
4. Stevanovic A. Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice / A. Stevanovic // *National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Synthesis*. — 2010. — Vol. 403.
5. ГОСТ Р 52289-2019 «Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств»
6. ОДМ 218.2.032-2013 «Методические рекомендации по учету движения транспортных средств на автомобильных дорогах»
7. Дормидонтова Т.В. Обустройство автомобильных дорог, с применением интеллектуальных транспортных систем / Т.В. Дормидонтова, С.В. Евдокимов // *Методология безопасности среды жизнедеятельности: сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции, Симферополь, 14–17 октября 2024 года*. — Симферополь: Ариал, 2024. — С. 180–184. — EDN: UHDPX.
8. Глазко В.А. Перспективы развития интеллектуальных транспортных систем в регионах России / В.А. Глазко, Т.В. Дормидонтова // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сборник статей 80-ой Юбилейной всероссийской научно-технической конференции, Самара, 17–22 апреля 2023 года / Под ред. М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова*. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2023. — С. 223–228. — EDN: MQFWHY.
9. Дормидонтова Т.В. Изучение существующих методов детектирования транспортных средств / Т.В. Дормидонтова, А.В. Аляпкин // *Тенденции развития науки и образования*. — 2023. — № 98-11. — С. 35–40. — DOI: 10.18411/trnio-06-2023-607. — EDN: JJFOAU.
10. Тумашев А.И. Автоматизированная система управления дорожным движением (АСУДД) / А.И. Тумашев // *Инновационная наука*. — 2022. — № 11-1. — С. 30–33. — EDN: TVCEYD.
11. Великанов А.А. Разработка автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД) на кольцевых пересечениях / А.А. Великанов, В.Г. Барабанов // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. — 2023. — № 3 (274). — С. 44–47. — DOI: 10.35211/1990-5297-2023-3-274-44-47. — EDN: OZIPAV.
12. Гылычмергенов Т. Модели управления дорожным движением для АСУДД / Т. Гылычмергенов // *Вестник науки*. — 2023. — Т. 4. — № 5 (62). — С. 895–898. — EDN: JAIFCY.
13. Андронов Р.В. Моделирование адаптивного режима работы регулируемого пересечения в составе магистральной АСУДД / Р.В. Андронов, Е.Э. Леверенц // *Архитектура, строительство, транспорт*. — 2023. — № 3 (105). — С. 81–88. — DOI: 10.31660/2782-232X-2023-3-81-88. — EDN: UBKYRW.
14. Петров В.В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах / В.В. Петров. — Омск: Сибирский государственный автомобильнодорожный университет (СибАДИ), 2021. — 99 с.
15. Андронов Р.В. Исследование транспортных потоков городской улично-дорожной сети на стационарность методом дисперсионного анализа / Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц, В. О. Доманский [и др.] // *Научно-технический вестник Поволжья*. — 2022. — № 9. — С. 7–11.
16. Андронов Р.В. Моделирование транспортных пересечений городских улиц с адаптивным регулированием дорожного движения / Р.В. Андронов, Е.Э. Леверенц, Т.В. Мальцева // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. — 2022. — Т. 8. — № 1 (29). — С. 144–160. — DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-1-144-160.
17. Ие О.Н. Имитационное моделирование транспортных систем: программные средства и направления их совершенствования / О.Н. Ие // *Актуальные вопросы современной экономики*. — 2020. — № 5. — С. 428–439.
18. Вишневский В.М. Гибридная система идентификации транспортных средств / В.М. Вишневский, Р.Н. Минниханов, И.В. Барский [и др.] // *Вестник НЦБЖД*. — 2022. — № 4 (54). — С. 33–41.
19. Иванова Н.А. Экономическое обоснование использования АСУДД на автомобильных дорогах и автомагистралях для решения задач национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» / Н.А. Иванова, Б.И. Роскопинский, А.А. Дворянчикова // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. — 2023. — Т. 14. — № 6. — С. 37–42. — EDN: UNIMRI.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vlahogianni E.I. Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going / E.I. Vlahogianni, M.G. Karlaftis, J.C. Golias // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2014. — Vol. 43. — P. 3–19.
2. Goryachev A.V. *Intellektual'nye transportnye sistemy: uchebnoe posobie* [Intelligent transport systems: a tutorial] / A.V. Goryachev, A.A. Lysak. — Moscow: Academy, 2018. — 256 p. [in Russian]
3. Kocherga E.V. *Metody i sredstva avtomatizirovannogo kontrolya parametrov transportnyh potokov* [Methods and means of automated control of traffic flow parameters] / E.V. Kocherga // *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management]. — 2020. — № 5. — P. 34–39 [in Russian]
4. Stevanovic A. Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice / A. Stevanovic // *National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Synthesis*. — 2010. — Vol. 403.



5. GOST R 52289-2019 «Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya. Pravila primeneniya dorozhnykh znakov, razmetki, svetoforov, dorozhnykh ograzhdenij i napravlyayushchih ustrojstv» [GOST R 52289-2019 "Technical means of traffic management. Rules for the use of road signs, markings, traffic lights, road barriers, and guide devices"] [in Russian]
6. ODM 218.2.032-2013 «Metodicheskie rekomendatsii po uchetu dvizheniya transportnykh sredstv na avtomobil'nykh dorogah» [ODM 218.2.032-2013 "Methodological recommendations for recording the movement of vehicles on highways"] [in Russian]
7. Dormidontova T.V. Obustrojstvo avtomobil'nykh dorog, s primeneniem intellektual'nykh transportnykh sistem [Development of highways using intelligent transport systems] / T.V. Dormidontova, S.V. Evdokimov // Metodologiya bezopasnosti sredey zhiznedeyatel'nosti [Methodology of living environment safety]: collection of scientific papers of the XVII International Scientific and Practical Conference, Simferopol, October 14–17, 2024. — Simferopol: Arial, 2024. — P. 180–184. — EDN: UHDPRX. [in Russian]
8. Glazko V.A. Perspektivy razvitiya intellektual'nykh transportnykh sistem v regionah Rossii [Prospects for the Development of Intelligent Transport Systems in the Regions of Russia] / V.A. Glazko, T.V. Dormidontova // Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'stvo i stroitel'nye tekhnologii [Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Construction and Construction Technologies]: Collection of Articles of the 80th Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference, Samara, April 17–22, 2023 / Ed. by M.V. Shuvalov, A.A. Pishchulev, A.K. Strelkov. — Samara: Samara State Technical University, 2023. — P. 223–228. — EDN: MQFWHY. [in Russian]
9. Dormidontova T.V. Izuchenie sushchestvuyushchih metodov detektirovaniya transportnykh sredstv [Study of existing methods of detecting vehicles] / T.V. Dormidontova, A.V. Alyapkin // Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya [Trends in the development of science and education]. — 2023. — № 98-11. — P. 35–40. — DOI: 10.18411/trnio-06-2023-607. — EDN: JJFOAU. [in Russian]
10. Tumashev A.I. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya dorozhnym dvizheniem (ASUDD) [Automated traffic control system (ATCS)] / A.I. Tumashev // Innovatsionnaya nauka [Innovative science]. — 2022. — № 11-1. — P. 30–33. — EDN: TVCEYD. [in Russian]
11. Velikanov A.A. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniem (ASUDD) na kol'cevyykh peresecheniyah [Development of an automated traffic control system (ATCS) at roundabout intersections] / A.A. Velikanov, V.G. Barabanov // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Volgograd State Technical University]. — 2023. — № 3 (274). — P. 44–47. — DOI: 10.35211/1990-5297-2023-3-274-44-47. — EDN: OZIPAV. [in Russian]
12. Gylychmergenov T. Modeli upravleniya dorozhnym dvizheniem dlya ASUDD [Traffic management models for automated traffic management systems] / T. Gylychmergenov // Vestnik nauki [Science Bulletin]. — 2023. — Vol. 4. — № 5 (62). — P. 895–898. — EDN: JAIFCY. [in Russian]
13. Andronov R.V. Modelirovanie adaptivnogo rezhima raboty reguliruemogo peresecheniya v sostave magistral'noy ASUDD [Modeling the adaptive operating mode of a controlled intersection as part of a highway automated traffic management system] / R.V. Andronov, E.E. Leverents // Arhitektura, stroitel'stvo, transport [Architecture, construction, transport]. — 2023. — № 3 (105). — P. 81–88. — DOI: 10.31660/2782-232X-2023-3-81-88. — EDN: UBKYRW. [in Russian]
14. Petrov V.V. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniem v gorodakh [Automated traffic control systems in cities] / V.V. Petrov. — Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), 2021. — 99 p. [in Russian]
15. Andronov R.V. Issledovanie transportnykh potokov gorodskoy ulichno-dorozhnoy seti na stacionarnost' metodom dispersionnogo analiza [Study of traffic flows of the urban street and road network for stationarity using the analysis of variance method] / R. V. Andronov, E. E. Leverents, V. O. Domansky [et al.] // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]. — 2022. — № 9. — P. 7–11. [in Russian]
16. Andronov R.V. Modelirovanie transportnykh peresechenij gorodskih ulic s adaptivnym regulirovaniem dorozhnogo dvizheniya [Modeling of transport intersections of city streets with adaptive traffic control] / R.V. Andronov, E.E. Leverents, T.V. Maltseva // Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko -matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika [Bulletin of Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy]. — 2022. — Vol. 8. — № 1 (29). — P. 144–160. — DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-1-144-160. [in Russian]
17. Ie O.N. Imitatsionnoe modelirovanie transportnykh sistem: programmnyye sredstva i napravleniya ih sovershenstvovaniya [Simulation modeling of transport systems: software tools and directions for their improvement] / O.N. Ie // Aktual'nye voprosy sovremennoy ekonomiki [Current issues of modern economics]. — 2020. — № 5. — P. 428–439. [in Russian]
18. Vishnevskiy V.M. Gibrinaya sistema identifikatsii transportnykh sredstv [Hybrid vehicle identification system] / V.M. Vishnevskiy, R.N. Minnihanov, I.V. Barskiy [et al.] // Vestnik NCBZhD [Bulletin of the National Central Bus Transport Union]. — 2022. — № 4 (54). — P. 33–41. [in Russian]
19. Ivanova N.A. Ekonomicheskoe obosnovanie ispol'zovaniya ASUDD na avtomobil'nykh dorogah i avtomagistral'yah dlya resheniya zadach nacional'nogo proekta «Bezopasnye i kachestvennyye avtomobil'nye dorogi [Economic justification for the use of automated traffic management systems on roads and highways to solve the problems of the national project "Safe and high-quality roads"] / N.A. Ivanova, B.I. Roskopinsky, A.A. Dvoryanchikova // Sistemy sinhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov [Systems for synchronization, generation and processing of signals]. — 2023. — Vol. 14. — № 6. — P. 37–42. — EDN: UNIMRI. [in Russian]