

ВЛИЯНИЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОФОРНЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ СМЕЖНЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ

МИТРОХИН Максим Александрович, докт. техн. наук, профессор¹; e-mail: mmax83@mail.ru
АЛЯЕВ Александр Олегович, лаборант-исследователь¹; e-mail: alyaev-2003@mail.ru
ЛОБАНОВ Рамиль Ильясович, студент¹; e-mail: ramil_lobanov@mail.ru
СЕМЁНКИН Максим Викторович, генеральный директор²; e-mail: maxim.semekin@codeinside.ru

¹ Пензенский государственный университет, кафедра «Вычислительная техника», Пенза

² ООО CodeInside, Пенза

Статья посвящена исследованию воздействия адаптивных алгоритмов управления светофорными объектами на одном перекрестке на изменения в движении транспорта на смежных перекрестках. Основная цель исследования заключается в выявлении преимуществ и недостатков внедрения таких алгоритмов для оценки влияния на смежные перекрестки. К исследованию предложены три алгоритма: пропуска очередей, перераспределения длительности фаз и оценки времени ожидания. Исследование включало моделирование трафика, сбор данных о времени ожидания и длине очередей, а также оценку изменений в транспортных потоках на смежных перекрестках. С помощью интеллектуальных камер были собраны данные, что позволило выявить, как изменение планов работы светофоров на одном перекрестке влияет на трафик смежных перекрестков. Доказаны возможные изменения в трафике на смежных перекрестках, в частности увеличение количества ожидающих транспортных средств и среднего времени ожидания, что говорит об отрицательном влиянии адаптивных алгоритмов на смежные перекрестки.

Ключевые слова: моделирование транспортных потоков, трафик, симулятор городской мобильности, алгоритм управления светофорами, смежные перекрестки

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-03-282-295

▼ Введение

Светофоры как один из элементов городской дорожной инфраструктуры играют важную роль в обеспечении безопасности и управления движением на дорогах. С течением времени и увеличением количества транспорта существующие алгоритмы управления светофорами не позволяют в полной мере раскрыть потенциал дорожной инфраструктуры, в результате чего возникают заторы. В связи с этим активно исследуются и разрабатываются адаптивные алгоритмы управления светофорами, которые позволяют снижать транспортные проблемы в городах.

В исследованиях отечественных [1, 2] и иностранных [3, 4] авторов обозначены перспективность и эффективность использования адаптивных и интеллектуальных алгоритмов управления светофорными объектами.

В работе [5] авторы отмечают увеличение пропускной способности полосы движения до

50% при использовании адаптивных алгоритмов управления светофорами.

В рамках изучения адаптивных алгоритмов управления дорожными сигналами авторами [6] выяснено, что их использование уменьшает среднее время ожидания ТС на перекрестке.

В исследовании [7] доказано, что использование генетического алгоритма увеличивает эффективность управления дорожным движением за счет адаптивного регулирования длительностью фаз светофоров.

При динамическом изменении планов работы светофорного объекта на перекрестке происходит изменение длительности цикла светофора, а также распределения времени между различными направлениями движения. Эти изменения могут оказать как положительное, так и отрицательное влияние на транспортный поток на смежных перекрестках. То есть улучшение пропускной способности и снижение

времени ожидания на одном перекрестке могут увеличить очереди и время ожидания на смежных перекрестках и, как следствие, увеличить время движения на участке дорожной сети.

Цель статьи заключается в анализе влияния внедрения адаптивных алгоритмов работы светофорных объектов на перекрестке на изменение трафика смежных перекрестков. Анализ необходим для выявления потенциальных преимуществ и недостатков внедрения адаптивных алгоритмов расчета планов работы светофорных объектов.

Этапы исследования включают определение критериев оценки изменений трафика, моделирование трафика при внедрении адаптивных алгоритмов изменения планов работы светофоров, сбор данных о времени ожидания и длине очередей на перекрестках в процессе моделирования, а также оценку влияния адаптивного изменения планов работы светофоров одного из перекрестков на параметры трафика смежных перекрестков.

Основные задачи работы — модернизация разработанного ранее программного обеспечения моделирования трафика на основе данных о движении транспорта с интеллектуальной камеры в направлении реализации возможности оценки алгоритмов управления светофорными объектами, а также разработка и тестирование самих алгоритмов управления светофорами.

В данной работе для проведения анализа адаптивных алгоритмов управления светофорами будут использоваться программное обеспечение SUMO и ранее созданная имитационная модель транспортных потоков [8]. Особое внимание в модели будет уделено влиянию адаптивных алгоритмов работы светофоров на смежные перекрестки. Это позволит оценить эффективность их работы и сделать выводы об их применимости в условиях реального дорожного движения.

1. Исходные данные для моделирования транспортных потоков

Исходными для моделирования служат данные, представленные в виде файла формата CSV¹. В этом файле каждая запись о проезде транспортного средства (далее — ТС) через

перекресток отображается в отдельной ячейке таблицы. В этих данных содержится информация о типе проезжающего ТС, его начальной и конечной позициях, времени пересечения перекрестка.

Для сбора информации о трафике используется интеллектуальная камера², работающая в составе информационной системы³ и применяющая нейросетевые алгоритмы для обнаружения и классификации ТС, фиксации времени и направления их проезда через перекресток.

На основе этих данных создана модель [8], воспроизводящая реальный дорожный трафик, реализованная в виде программного продукта.

Используемая модель автоматически обрабатывает данные, полученные с камеры, подготавливает их для запуска модели в программе SUMO, где и происходит моделирование.

Ранее разработанное программное обеспечение было модернизировано добавлением блока управления светофорными объектами с адаптивными алгоритмами.

Модернизированная схема взаимодействия модулей программы представлена на рис. 1. Программа позволяет автоматически тестировать различные алгоритмы управления светофорными объектами, собирая информацию о характеристиках дорожного движения на анализируемых перекрестках.

Согласно блок-схеме, исходные данные о реальном трафике, полученные с интеллектуальной камеры, поступают в блок обработки файла с данными, где считываются функцией *CSVReader* из CSV-файла. Далее редактируются ошибочные данные о проезде транспортных средств и функция *CountData* подсчитывает количество ТС за определенное время.

При помощи функции *ChangeTimeInPeriod* случайным образом определяется время появления каждого ТС в режиме симуляции. Время рассчитывается с использованием формулы (1), описанной в статье [8].

В блоке управления моделированием происходит инициализация и настройка конфигурационных файлов SUMO и настройка характеристик ТС.

² URL: <https://habr.com/ru/articles/725916/>

³ URL: <http://traffic.codeinside.ru/>

¹ CSV — Comma-Separated Values.

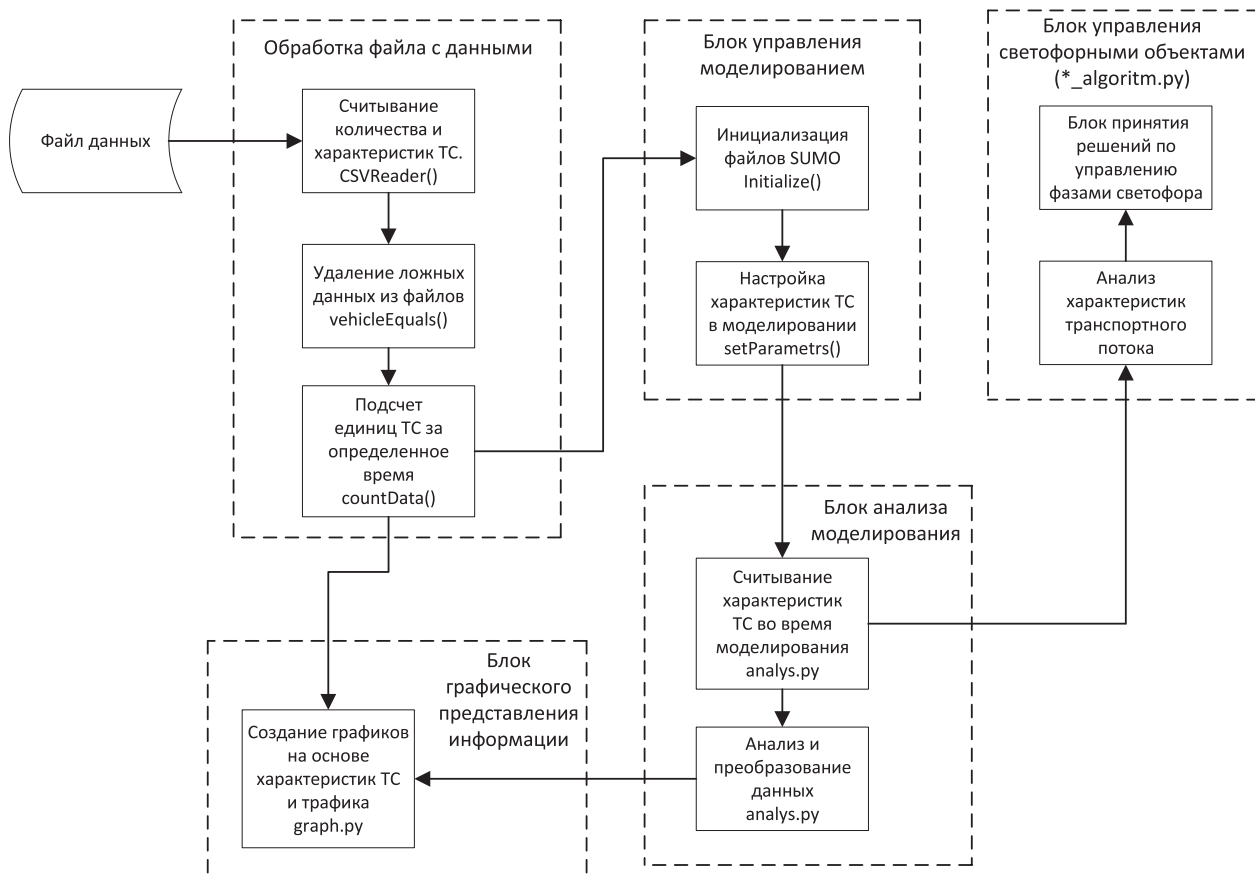


Рис. 1. Блок-схема взаимодействия блоков программы

Во время моделирования блок анализа моделирования собирает информацию о характеристиках ТС (таких как средняя скорость, очереди на перекрестке, среднее время ожидания и т.д.) и передает ее в блок управления светофорными объектами с реализованными алгоритмами управления светофорами.

После этого блок управления светофорными объектами принимает решение об изменениях в работе светофоров на основании текущего алгоритма управления светофором.

По окончании моделирования блок графического представления информации создает графики зависимостей различных характеристик дорожного движения от времени моделирования.

2. Описание адаптивных алгоритмов управления светофорными объектами

В рамках исследования в виде алгоритмов реализованы три наиболее распространенных способа адаптивного управления работой светофорных объектов [9].

Алгоритм, предусматривающий пропуск очередей, образовавшихся в период действия запрещающего сигнала (далее — алгоритм 1), основан на динамической адаптации к текущим условиям дорожного движения. Он идентифицирует каждое ТС на перекрестке при помощи детекторов, записывая их идентификационные номера в список во время красной фазы светофора (далее — список красной фазы). При смене на зеленый сигнал алгоритм исключает из списка те ТС, которые движутся по выходным дорогам, обеспечивая проезд только тем ТС, которые были зарегистрированы камерой во время красной фазы светофора. В рамках программного обеспечения модели SUMO все ТС, проезжающие через детекторы, будут зарегистрированы алгоритмом. После удаления всех ТС из списка красной фазы светофор переключается на красный сигнал, повторяя цикл записи ТС во время красного сигнала светофора. Для предотвращения ситуации бесконечного ожидания, когда алгоритм по тем или иным причинам не сможет считать номер хотя бы одного автомобиля

на выходе из перекрестка, используется таймер максимального времени зеленой фазы. Если зеленая фаза светофора продолжается больше определенного времени (которое задается заранее), то она автоматически переключается на красную и оставшаяся очередь переносится на следующий цикл работы светофора.

Ниже приведено описание ключевых шагов алгоритма в формате псевдокода в рамках модели в SUMO.

```

алг УПРАВЛЕНИЕ_СВЕТОФОРОМ
нач

веществ максимальное_время_фазы
табл l1, l2, l'1, l'2, l'3, l'4

процедура РЕГИСТРАЦИЯ_ОЧЕРЕДЕЙ
если фаза_светофора = "красный"
тогда
пока фаза_светофора = "красный"
делать
для каждого детектора D1
считать номер проехавшего
ТС и добавить его в список
конец
// Обновление очередей
l1 = l'1 + l'3
l2 = l'2 + l'4
конец
конец

процедура УПРАВЛЕНИЕ_ЗЕЛЕНЬМ_СВЕТОМ
если фаза_светофора = "зеленый"
тогда
для каждого детектора D1
прекратить запись номеров
конец

для каждого детектора D2
пока есть проезжающие ТС
делать
удалять номер проезжающего
ТС из списка
конец
конец

если список пуст или проверка_
времени (текущее_время_фазы,
максимальное_время_фазы) тогда

```

```

переключить светофор на
"красный"
конец
конец
конец
конец

```

Преимущества данного алгоритма в управлении светофором включают повышение эффективности движения на перекрестках за счет оптимизации потока транспорта. Этот алгоритм также способствует снижению временных задержек для участников дорожного движения благодаря учету очереди и пропуску только тех ТС, которые были зарегистрированы датчиком во время красной фазы светофора.

Недостатки этого алгоритма в управлении светофором могут включать неэффективность при высоких нагрузках, когда интенсивность движения приближается к максимальным значениям. В таких условиях алгоритм может столкнуться с трудностями в идентификации ТС и распределении фаз, что может привести к возникновению заторов и увеличению временных задержек для участников дорожного движения.

Алгоритм, предусматривающий перераспределение длительности фаз внутри цикла на основе анализа текущих фазовых коэффициентов в конфликтующих направлениях (далее — алгоритм 2), представляет собой систему управления светофорами на перекрестке, целью которой является оптимизация времени работы светофорных фаз в зависимости от текущей интенсивности движения. Он основан на стратегии адаптации, использующей данные, собранные за определенное количество циклов светофора. Параметры светофора, такие как максимальная и минимальная длительность фаз, а также время сдвига фазы, задаются заранее. В период красной фазы светофора алгоритм регистрирует очереди на направлениях движения. При переключении на зеленый свет алгоритм сравнивает длину очереди за текущий и предыдущий периоды и при изменении очереди корректирует длительность цикла светофора, обеспечивая адаптивность в управлении трафиком таким образом, чтобы направлениям, на которых сформировались более длинные очереди по сравнению

с предыдущим циклом работы светофора, выделялось большее время зеленой фазы.

Ниже представлено описание алгоритма в формате псевдокода.

```

алг УПРАВЛЕНИЕ_СВЕТОФОРОМ
нач

веществ Tmax, Tmin, Tсдвига
таб очередь_горизонталь, очередь_
вертикаль
веществ T(i), T(i-1), l(i), l(i-1)

процедура НАСТРОЙКА_ПАРАМЕТРОВ
(макс_фаза, мин_фаза, время_сдвига)
    Tmax = макс_фаза
    Tmin = мин_фаза
    Tсдвига = время_сдвига
конец

процедура РЕГИСТРАЦИЯ_ОЧЕРЕДЕЙ
    если фаза_светофора = "красный"
    тогда
        очередь_горизонталь = получить_
длину_очереди ("Суворова")
        очередь_вертикаль = получить_
длину_очереди ("Володарского")
    конец
конец

процедура ПЕРЕДАЧА_ЗНАЧЕНИЙ_ОЧЕРЕДИ
    если фаза_светофора = "зеленый"
    тогда
        l(i) = очередь_горизонталь +
очередь_вертикаль
        l(i-1) = получить_прошлую_
длину_очереди ()
    конец
конец

процедура КОРРЕКЦИЯ_ДЛИТЕЛЬНОСТИ_
ФАЗЫ
    если l(i) > l(i-1) и Ti + Tсдвига
< Tmax тогда
        T(i) = T(i) + Tсдвига

        иначе если l(i) < l(i-1) и Ti -
Tсдвига > Tmin тогда
            Ti = T(i) - Tсдвига
        конец если

```

```

        установить_фазу_светофора (Ti)
конец
конец
конец

```

где l_i — очередь за текущий период по направлениям;

l_{i-1} — очередь за предыдущий период по направлениям;

T_i — текущая фаза работы светофора;

$T_{\text{сдвига}}$ — время сдвига фазы.

Алгоритм 2 обладает несколькими преимуществами. В первую очередь это минимизация временных задержек благодаря учету средней очереди за несколько циклов. Это позволяет алгоритму эффективно адаптироваться к изменениям в транспортных потоках и предоставлять оптимальное управление светофорами.

Автоматическое выравнивание фаз светофора представляет собой еще одну сильную сторону алгоритма. Оно самостоятельно корректирует длительность цикла светофора, обеспечивая сбалансированное управление потоками движения на перекрестке.

Одним из недостатков данного алгоритма является чувствительность к временным изменениям интенсивности движения, что может привести к некорректным изменениям длительности светофорных фаз.

Алгоритм оценки времени ожидания (далее — алгоритм 3) в системе управления светофором представляет собой подход, направленный на оптимизацию длительности светофорных фаз в реальном времени за счет считывания времени ожидания ТС по направлениям.

Сначала система собирает данные о времени ожидания проезда перекрестка ТС, накапливая информацию о времени, проведенном в ожидании. Затем на основе этих данных система разрабатывает приоритеты для каждого направления движения, предоставляя больше времени по тем направлениям, где транспорт проводит более продолжительное время в ожидании. Эти приоритеты регулярно пересматриваются и оптимизируются в соответствии с актуальной дорожной обстановкой.

Ниже представлено описание алгоритма при помощи псевдокода.

```
алг УПРАВЛЕНИЕ_СВЕТОФОРОМ
```

```
нач
```

```
цел Tmin_v, Tmin_h, Tсдвига, Tmax  
цел номер_фазы  
таб логика_работы  
таб ID_список, время_ожидания  
стр текущая_фаза
```

```
логика_работы = получить_логики('В1')  
номер_фазы = получить_фазу("В1")
```

```
если номер_фазы = 0 тогда  
    текущая_фаза = "Суворова"  
    ID_список = получить_авто_на_красный(ID_список, текущая_фаза)  
    если время_до_переключения("В1") = 1 тогда  
        время_ожидания = получить_время_ожидания(ID_список, время_ожидания,  
            текущая_фаза)  
        если проверка_времени(время_ожидания) тогда  
            если сумма_времени(время_ожидания, [0, 2]) > сумма_времени(время_ожидания,  
                [1, 3]) тогда  
                если длительность_фазы(логика_работы, 2) > Tmin_v тогда  
                    уменьшить_длительность_фазы(логика_работы, 2, Tсдвига)  
                иначе  
                    если длительность_фазы(логика_работы, 2) < Tmax тогда  
                        увеличить_длительность_фазы(логика_работы, 2, Tсдвига)  
                    конец  
                установить_логики('В1', логика_работы)  
            конец  
            очистить_авто(ID_список, [1, 3])  
        конец  
    конец  
конец
```

```
если номер_фазы = 0 тогда  
    текущая_фаза = "Володарского"  
    ID_список = получить_авто_на_красный(ID_список, текущая_фаза)  
    если время_до_переключения("В1") = 1 тогда  
        время_ожидания = получить_время_ожидания(ID_список, время_ожидания,  
            текущая_фаза)  
        если проверка_времени(время_ожидания) тогда  
            если сумма_времени(время_ожидания, [0, 2]) > сумма_времени(время_ожидания,  
                [1, 3]) тогда  
                если длительность_фазы(логика_работы, 2) > Tmin_v тогда  
                    уменьшить_длительность_фазы(логика_работы, 2, Tсдвига)  
                иначе  
                    если длительность_фазы(логика_работы, 2) < Tmax тогда  
                        увеличить_длительность_фазы(логика_работы, 2, Tсдвига)  
                    конец  
                установить_логики('В1', логика_работы)  
            конец  
            очистить_авто(ID_список, [1, 3])  
        конец  
    конец  
конец
```

```
возврат vehicle_induction  
конец
```

Алгоритм 3 обладает несколькими преимуществами. Во-первых, он обеспечивает эффективное распределение времени светофорных фаз, предоставляя приоритет направлениям с более высоким временем ожидания. Это ведет к существенному снижению времени ожидания для водителей и оптимизации общего потока транспорта.

Во-вторых, минимизируется время ожидания при отсутствии движения на определенных дорогах, так как система быстро реагирует на изменения в интенсивности транспортного потока.

Тем не менее алгоритм не лишен недостатков. Его эффективность существенно зависит от точности и надежности сбора данных о времени ожидания. Недостаточно точные данные могут привести к ошибкам в распределении времени на светофорах.

3. Анализ влияния алгоритмов работы светофора на функционирование смежных перекрестков

Оценка влияния алгоритмов управления светофором на смежные перекрестки зависит от множества критериев, которые учитывают различные аспекты дорожного движения. К таким критериям можно отнести среднюю скорость движения, среднюю очередь по направлениям, среднее время ожидания и т.д.

Все вышеперечисленные характеристики находятся в зависимостях между собой. Например, увеличение средней очереди по одному направлению может привести к снижению средней скорости, что, в свою очередь, увеличит среднее время ожидания на этом направлении. Таким образом, изменение одного критерия неизбежно влечет за собой изменения других, что подчеркивает необходимость комплексного подхода при оценке и внедрении алгоритмов управления светофорами.

Для оценки изменений трафика на смежных перекрестках будем использовать следующие критерии: среднее время ожидания ТС проезда перекрестка и длину очереди на перекрестке.

Длина очереди напрямую связана с пропускной способностью светофора и его способностью эффективно регулировать транспортный поток. Подобный критерий использует А. Ю. Харабаджи [10] в своих исследованиях

по регулированию светофорных циклов. Большая длина очереди может указывать на неэффективное управление светофором, что может привести к задержкам и перегрузке дорожной инфраструктуры.

Уменьшение среднего времени ожидания является важным для улучшения общего потока транспорта и уменьшения издержек времени для водителей. Авторы [11–13] используют такой критерий для оценки изменений в дорожном движении. Снижение времени ожидания может привести к повышению удовлетворенности пользователей дорог и снижению выбросов вредных веществ в атмосферу.

В рамках нашего исследования особое внимание уделяется анализу влияния центрального перекрестка с адаптивным регулированием светофорного объекта на смежные с ним перекрестки со статичными алгоритмами управления светофорами. Данные перекрестки расположены в городе Пензе: центральным считается перекресток Суворова — Володарского, смежные — Суворова — Плеханова и Суворова — Московская.

На рис. 2 представлена схема перекрестка, реализованного в модели.

Данные для перекрестков представляют собой три CSV-файла с записями о проездах ТС: 7291 строка для перекрестка Суворова — Московская; 13 173 строки для перекрестка Суворова — Плеханова; 13 845 строк для перекрестка Суворова — Володарского, где каждая строка представляет собой проезд ТС по перекрестку.

Для выявления статистической зависимости между полученными результатами мы будем использовать T-критерий Уилкоксона [14]. Этот непараметрический тест позволяет сравнить две связанные выборки и определить, есть ли статистически значимая разница между ними, не делая предположений о нормальности распределения данных.

Использование критерия Уилкоксона является обоснованным в данном случае, так как мы располагаем двумя наборами данных о характеристиках дорожного движения: один содержит результаты моделирования при функционирующем алгоритме адаптации светофорных планов, а другой — при статических планах работы светофоров.



Рис. 2. Дорожная сеть для тестирования алгоритмов 1–3

Этот критерий позволяет проверить, существует ли статистически значимое различие между двумя состояниями, что дает возможность сделать выводы о влиянии алгоритма на смежные перекрестки.

После анализа различий в среднем количестве ожидающих ТС с использованием критерия Уилкоксона дополнительно оценим эффект алгоритма, вычислив процентное изменение характеристик в моделированиях с алгоритмом и без алгоритма по формуле:

$$\Delta = \frac{A_c - A_{\text{без}}}{A_c} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $A_{\text{без}}$ — среднее значение характеристики без использования алгоритма;

A_c — среднее значение характеристики с использованием алгоритма.

Для дальнейшего анализа полученных результатов мы рассчитаем и сравним коэффициенты вариации (CV) [15], которые позволяют оценить относительный разброс данных вокруг среднего значения. В контексте исследования его можно интерпретировать как меру относительной изменчивости характеристик дорожного движения. Для вычисления будем использовать формулу:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где σ — стандартное отклонение;

μ — среднее значение.

Рассчитаем стандартное отклонение по формуле:

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

где x_i — каждое наблюдаемое значение выбранной характеристики дорожного движения;

\bar{x} — среднее значение выбранной характеристики дорожного движения;

n — количество наблюдений.

Ниже представлены графики зависимостей ранее выбранных характеристик дорожного движения от времени моделирования для направлений, соединяющих перекрестки. Для перекрестка Суворова — Плеханова таким направлением является Суворова — Восток, а для перекрестка Суворова — Московская — направление Суворова — Запад. Сплошная линия показывает характеристики дорожного движения без использования адаптивного алгоритма, а пунктирная — с использованием алгоритма.

Результаты моделирования алгоритма 1 показаны на рис. 3 для перекрестка Суворова — Плеханова и на рис. 4 для перекрестка Суворова — Московская.

Проведенные вычисления для алгоритма 1 показаны в табл. 1.

Согласно полученным значениям T-критерия при уровне значимости 0,05, можно сделать вывод, что разница в результате использования алгоритма является статистически значимой для двух характеристик на двух перекрестках.

Результаты показали, что смежные перекрестки подвергаются значительному влиянию при использовании алгоритма, предусматривающего пропуск очередей.

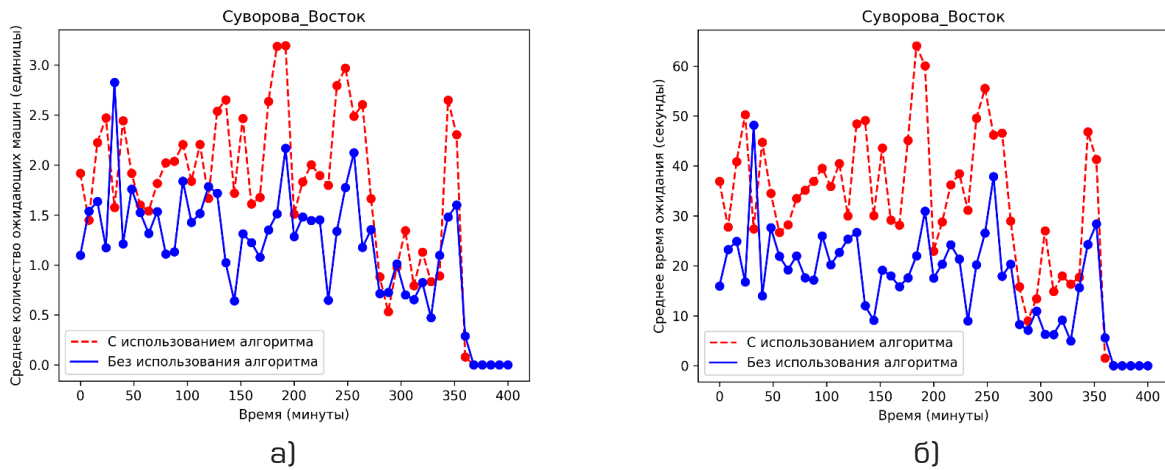


Рис. 3. Графики влияния на характеристики дорожного движения смежного перекрестка Суворова — Плеханова для алгоритма 1

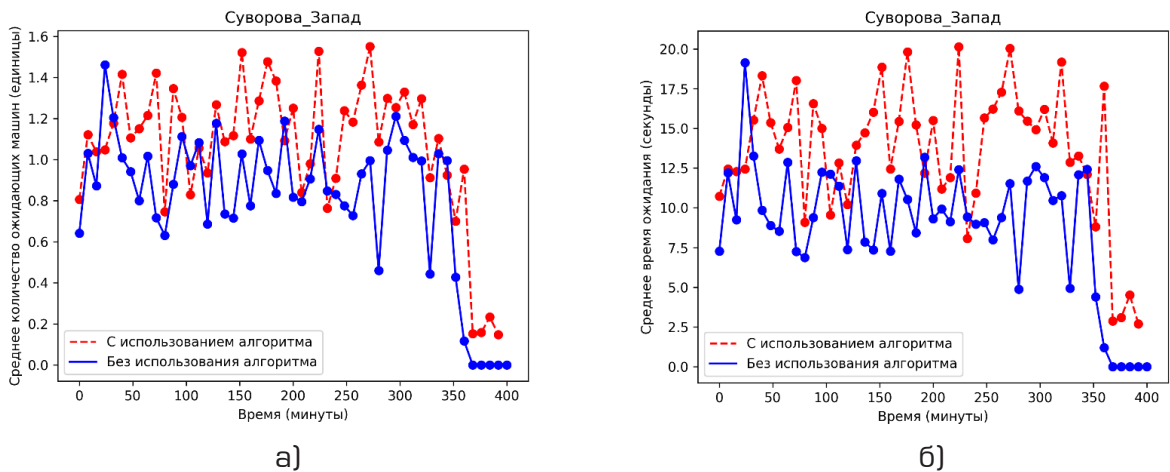


Рис. 4. Графики влияния на характеристики дорожного движения смежного перекрестка Суворова — Московская для алгоритма 1

Таблица 1. Результаты моделирования при использовании алгоритма 1

Перекресток	Использование алгоритма	Критерий Уилкоксона. Среднее количество ожидающих ТС (ТС)	Критерий Уилкоксона. Среднее время ожидания (с)	Изменение количества ожидающих ТС (%)	Изменение среднего времени ожидания (%)	Коэффициент вариации. Среднее количество ТС (%)	Коэффициент вариации. Среднее время ожидания (%)
Суворова — Плеханова	С алгоритмом	18	46	+27,56	+19,37	42,65	43,32
	Без алгоритма					43,97	46,29
Суворова — Московская	С алгоритмом	154	115	+25,42	+28,81	60,85	61,91
	Без алгоритма					64,69	66,41

Однако коэффициенты вариации для моделирования с алгоритмом 1 немного ниже, чем для моделирования без него. Следовательно, можно сделать вывод о том, что алгоритм слегка улучшает стабильность характеристик, снижая их изменчивость.

Использование алгоритма 1 приводит к увеличению количества ожидающих ТС и среднего времени ожидания на смежных перекрестках, но при этом снижает изменчивость этих характеристик.

Результаты моделирования алгоритма 2 показаны на рис. 5 для перекрестка Суворова —

Плеханова и на рис. 6 для перекрестка Суворова — Московская.

Аналогичные расчеты для алгоритма 2 показаны в табл. 2.

Используя таблицу Т-критерия при уровне значимости 0,05, мы пришли к выводу, что различия в результатах, полученные при использовании алгоритма, являются статистически значимыми для используемых характеристик на данных перекрестках.

В результате моделирования и проведенных расчетов было выяснено, что алгоритм 2 так же оказывает значительное влияние на

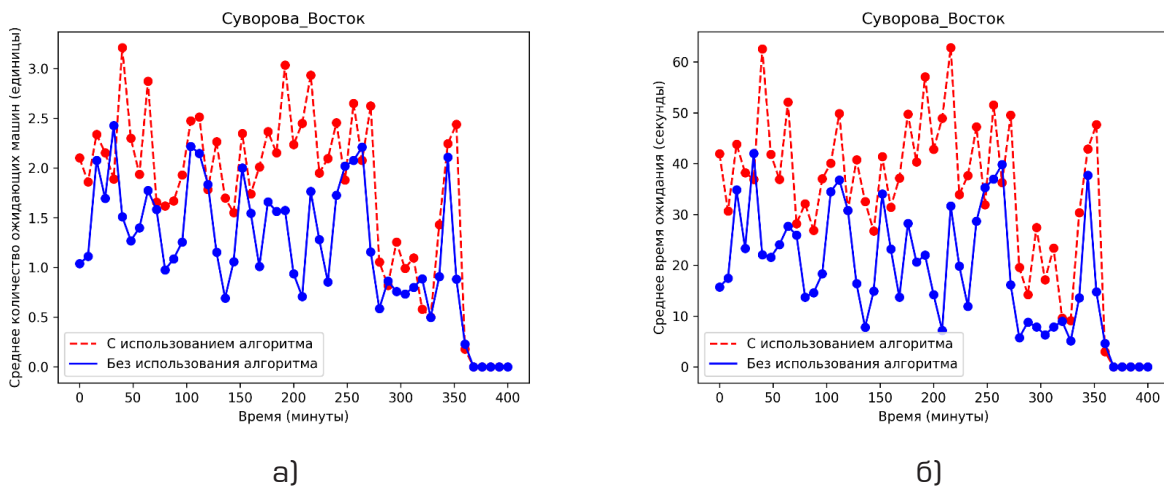


Рис. 5. Графики влияния на характеристики дорожного движения смежного перекрестка Суворова — Плеханова для алгоритма 2

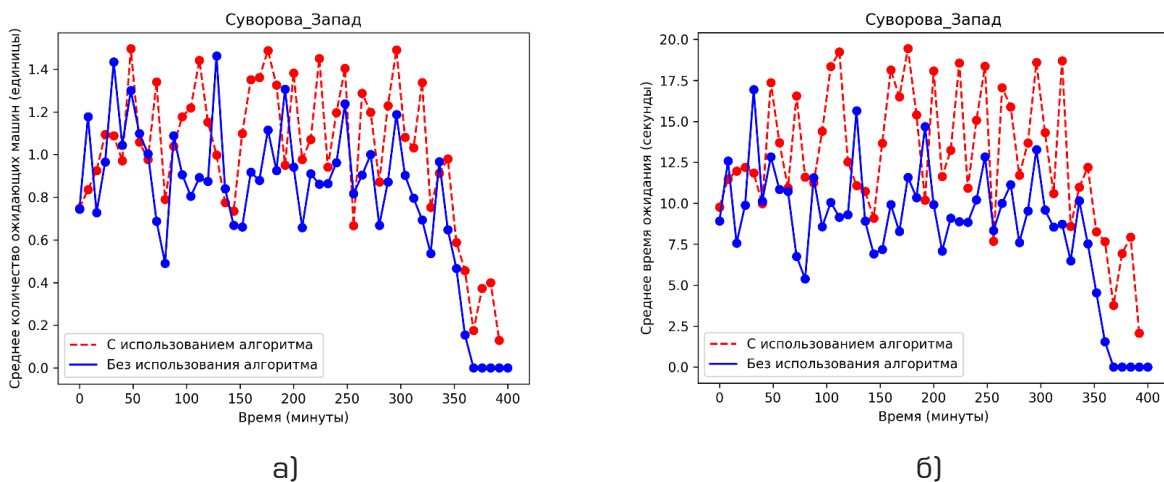


Рис. 6. Графики влияния на характеристики дорожного движения смежного перекрестка Суворова — Московская для алгоритма 2

Таблица 2. Результаты моделирования при использовании алгоритма 2

Перекресток	Использование алгоритма	Критерий Уилкоксона. Среднее количество ожидающих ТС (ТС)	Критерий Уилкоксона. Среднее время ожидания (с)	Изменение среднего количества ожидающих ТС (%)	Изменение среднего времени ожидания (%)	Коэффициент вариации. Среднее количество ТС (%)	Коэффициент вариации. Среднее время ожидания (%)
Суворова — Плеханова	С алгоритмом	104	97	+31,28	+29,69	52,37	50,71
	Без алгоритма					53,45	51,37
Суворова — Московская	С алгоритмом	126	65	+19,37	+28,81	39,83	39,1
	Без алгоритма					41,3	40,8

функционирование смежных перекрестков, увеличивая среднее количество ожидающих ТС и среднее время ожидания более чем на 25%. Однако этот алгоритм снижает изменчивость исследуемых характеристик, что приводит к более стабильному функционированию перекрестка.

Результаты моделирования алгоритма 3 показаны на рис. 7 для перекрестка Суворова — Плеханова и на рис. 8 для перекрестка Суворова — Московская.

Расчеты для алгоритма 3 представлены в табл. 3.

Согласно таблице Т-критерия при уровне значимости 0,05, различия в результатах, полученные при использовании алгоритма, являются статистически значимыми для используемых характеристик на данных перекрестках.

Применение алгоритма 3 привело к статистически значимым увеличениям в среднем количестве ожидающих ТС и времени ожидания на перекрестках Суворова — Плеханова и Суворова — Московская. Алгоритм увеличивает количество ожидающих ТС и время ожидания, но снижает изменчивость количества ТС на одном перекрестке (Суворова — Плеханова), при этом увеличивая изменчивость времени ожидания на другом перекрестке (Суворова — Московская).

Заключение

Основным научным результатом работы является выявление влияния изменений в планах работы светофорных объектов на одном перекрестке на функционирование смежных перекрестков.

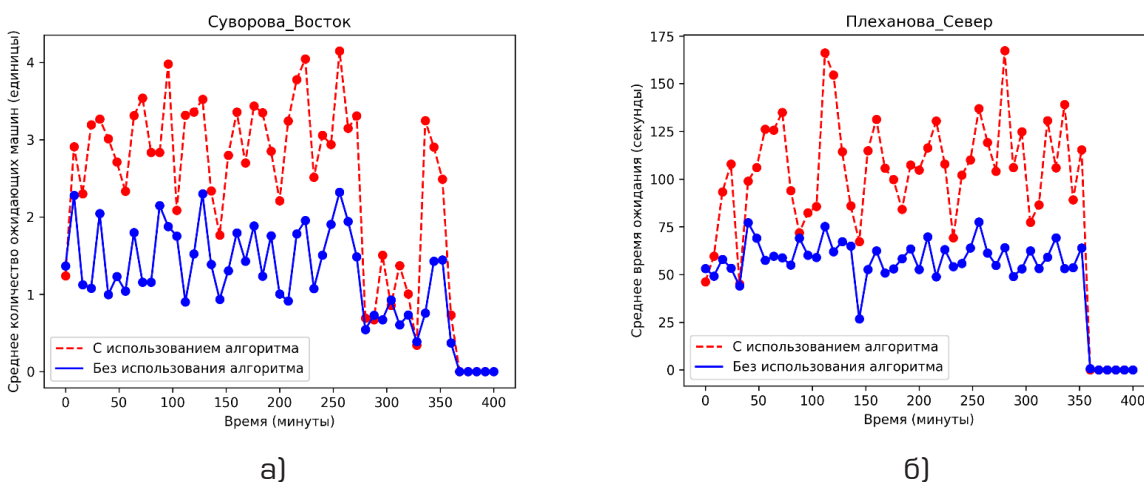


Рис. 7 (а, б). Графики влияния на характеристики дорожного движения смежного перекрестка Суворова – Плеханова для алгоритма 3

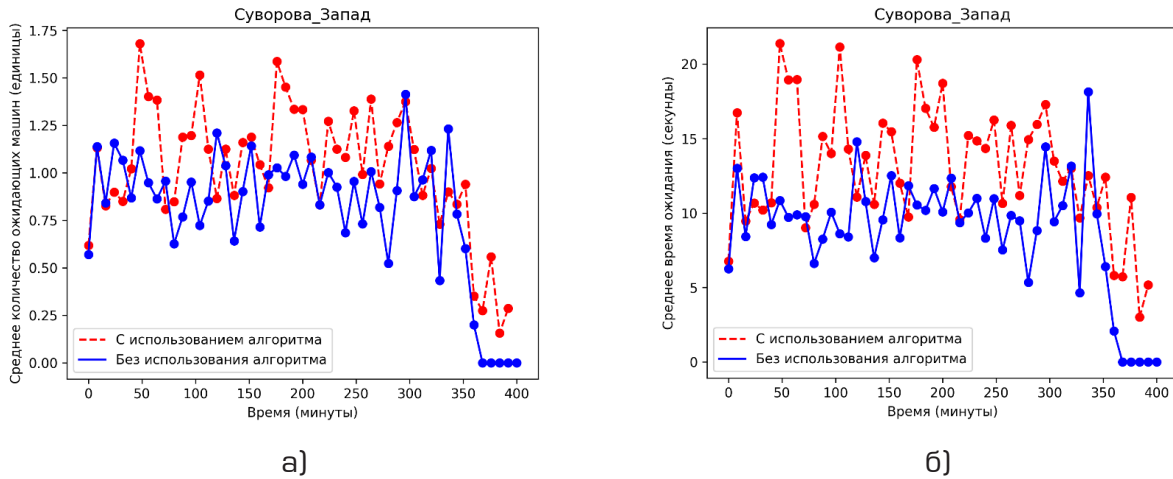


Рис. 8. Графики влияния на характеристики дорожного движения смежного перекрестка Суворова – Московская для алгоритма 3

Таблица 3. Результаты моделирования при использовании алгоритма 3

Перекресток	Использование алгоритма	Критерий Уилкоксона. Среднее количество ожидающих ТС (ТС)	Критерий Уилкоксона. Среднее время ожидания (с)	Изменение среднего количества ожидающих ТС (%)	Изменение среднего времени ожидания (%)	Коэффициент вариации. Среднее количество ТС (%)	Коэффициент вариации. Среднее время ожидания (%)
Суворова — Плеханова	С алгоритмом	248	201	+17,87	+24,98	41,96	46,91
	Без алгоритма					39,61	40,42
Суворова — Московская	С алгоритмом	231	189	31,32	34,1	34,96	32,63
	Без алгоритма					38,31	35,97

Уместно подчеркнуть, что все полученные результаты имеют статистическую значимость по итогам вычисления критерия Уилкоксона.

Проведенное исследование показало, что использование адаптивных алгоритмов работы светофорного объекта ухудшает характеристики движения и эффективности работы других перекрестков, увеличивая среднее время ожидания и очереди на перекрестке в среднем на 25% по сравнению с моделированием без использования алгоритмов.

С другой стороны, в большинстве случаев адаптивные алгоритмы на несколько процентов улучшают стабильность характеристик, снижая их изменчивость.

Исходя из анализа полученных результатов, можно сделать вывод, что при использова-

нии динамических алгоритмов на нескольких смежных перекрестках возможно возникновение каскадного эффекта, то есть постепенное увеличение количества ТС, которое может привести к отрицательным изменениям в характеристиках движения на ближайшем перекрестке со статичным изменением фаз работы светофорного объекта.

Выявленные негативные последствия использования адаптивных алгоритмов подчеркивают необходимость разработки и внедрения стратегий смягчения последствий. Одной из таких стратегий может стать скоординированное управление светофорными объектами на нескольких смежных перекрестках, что позволит синхронизировать их работу и минимизировать каскадные эффекты. Данная стратегия требует анализа текущих потоков

и их моделирования для разработки оптимальных режимов работы светофоров, которые бы обеспечивали равномерное распределение транспортных потоков и снижение нагрузки на критических участках дорожной сети.

Интеллектуальные системы управления транспортом, основанные на алгоритмах машинного обучения и нейронных сетях, могут сыграть ключевую роль в такой оптимизации. Эти системы способны динамически адаптироваться к изменяющимся условиям движения и прогнозировать последствия тех или иных изменений, что позволит более эффективно управлять транспортными потоками и снижать вероятность возникновения пробок и других негативных явлений.

В конечном итоге для оптимизации транспортных потоков в сети с несколькими перекрестками необходимо учитывать влияние на дорожную сеть каждого перекрестка, а также тщательно подходить к внедрению адаптивных алгоритмов, чтобы минимизировать негативные последствия для смежных перекрестков и повысить общую эффективность транспортной системы.

В дальнейшем модель будет развиваться по пути использования интеллектуальных алгоритмов, способных учитывать динамику всей транспортной сети и предсказывать изменения в условиях движения, что позволит более эффективно управлять потоками транспорта и снизить негативные последствия для смежных перекрестков. ▲

Авторы благодарят ООО «КодИнсайд» за предоставленные данные и финансовую поддержку проведенного исследования.

Библиографический список

1. Мирзаи Х. Разработка адаптивного алгоритма контроллера светофора с приоритетной выборкой в режиме реального времени // Вестник Воронежского государственного университета. 2017. № 1. С. 26–32.
2. Остапенко П.В., Султантемирова К.А., Сапрыкин О.Н. Адаптивное управление светофорным объектом на основе машинного обучения // Материалы VI Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020). Самара, 2020.
3. Faye S., Chaudet C., Demeure I. A Distributed Algorithm for Adaptive Traffic Lights Control // 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. USA, Anchorage, 2012.
4. Aleko D. R., Djahel S. An Efficient Adaptive Traffic Light Control System for Urban Road Traffic Congestion Reduction in Smart Cities // Emerging Topics in Wireless Communications for Future Smart Cities. 2020. No. 56. DOI:10.3390/info11020119.
5. Оптимизация работы адаптивных светофоров на основе использования машинного зрения / В.Д.Шепелев [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2017. Т. 14, № 1. С. 189–196. DOI: 10.14529/em200119.
6. Агафонов А.А., Юмаганов А.С., Мясников В.В. Эффективность адаптивного управления дорожными сигналами в условиях смешанного потока транспортных средств // Материалы IX Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2023). Самара, 2023.
7. Акопов А.С., Зарипов Е.А., Мельников А.М. Адаптивное управление транспортной инфраструктурой в городской среде с использованием генетического алгоритма вещественного кодирования // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18, №2. С.48–66. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.2.48.66.
8. Моделирование локальных транспортных потоков в условиях неполноты исходных данных. Текст: непосредственный / М.А.Митрохин [и др.] // Автоматика на транспорте. 2023. Т. 9, № 4. С. 355–367. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-355-367.
9. Кретов А.Ю. Обзор некоторых адаптивных алгоритмов светофорного регулирования перекрестков // Известия Тульского государственного университета. 2013. Т. 7, № 2. С. 61–67.
10. Харабаджи А.Ю. Исследование влияния длительности циклов светофорных объектов на длину очереди на смежных перекрестках // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 4–5. С. 61–67.
11. Юмаганов А.С., Агафонов А.А. Оптимизация траектории движения транспортных средств в задаче управления транспортными потоками на перекрестке // Материалы VIII Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2022). Самара, 2022.
12. Мясников В.В., Агафонов А.А., Юмаганов А.С. Детерминированная прогнозная модель управления

сигналами светофоров в интеллектуальных транспортных и геоинформационных системах // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 6. С. 917–925. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1031.

13. Анализ и моделирование транспортных потоков на перекрестке для управления качеством городской

среды / Т.В.Ерещенко [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2022. № 8. С. 99–107.

14. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods // Biometrics Bulletin. 1945. Vol. 1, no. 6. P. 80–83.
15. Everitt B. The Cambridge dictionary of statistics. Cambridge University Press, 1988. 67 p.

*TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, no. 3. P. 282–295
DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-03-282-295*

Investigation of the influence of lighting objects control algorithms on the characteristics of road traffic at intersections

Information about authors

Mitrokhin M. A., Doctor of Engineering, Professor¹. E-mail: mmax83@mail.ru

Alyayev A. O., Laboratory Assistant-researcher¹. E-mail: alyayev-2003@mail.ru

Lobanov R. I., Student¹. E-mail: ramil_lobanov@mail.ru

Semyonkin M. V., General Director². E-mail: maxim.semekin@codeinside.ru

¹ Penza State University, Department of “Computer technology”, Penza

² CodeInside LLC

Abstract: The article is devoted to the study of the impact of adaptive algorithms for controlling traffic lights at one intersection on changes in traffic at adjacent intersections. The main purpose of the study is to identify the advantages and disadvantages of implementing such algorithms to assess the impact on adjacent intersections. Three algorithms have been proposed for the study: queue skipping, phase duration redistribution, and waiting time estimation. The study included traffic modeling, data collection on waiting times, queue lengths, and an assessment of changes in traffic flows. Data was collected using smart cameras, which allowed us to identify how changing traffic light work plans at one intersection affects the dynamics of traffic at neighboring intersections. Possible changes in traffic at adjacent intersections are proved, in particular, an increase in the number of waiting vehicles and the average waiting time at adjacent intersections, which indicates the negative impact of adaptive algorithms on adjacent intersections.

Keywords: traffic flow modeling, traffic, urban mobility simulator, traffic light control algorithm, adjacent intersections

References

1. Mirzai X. Razrabotka adaptivnogo algoritma kontrollera svetofora s prioritetnoy vy`borkoj v rezhime real`nogo vremeni // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. № 1. S. 26–32. (In Russian)
2. Ostapenko P. V., Sultanemirova K. A., Sapry`kin O. N. Adaptivnoe upravlenie svetofornym ob`ektom na osnove mashinnogo obucheniya // Materialy VI Mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkoly “Informacionny`e texnologii i nanotexnologii” (ITNT-2020). Samara, 2020. (In Russian)
3. Faye S., Chaudet C., Demeure I. A Distributed Algorithm for Adaptive Traffic Lights Control // 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. USA, Anchorage, 2012.

4. Aleko D. R., Djahel S. An Efficient Adaptive Traffic Light Control System for Urban Road Traffic Congestion Reduction in Smart Cities // Emerging Topics in Wireless Communications for Future Smart Cities. 2020. No. 56. DOI: 10.3390/info11020119.
5. Optimizaciya raboty` adaptivny`x svetoforov na osnove ispol`zovaniya mashinnogo zreniya / V. D. Shepelev [i dr.] // Vestnik Yuzhno-ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. T. 14, № 1. S. 189–196. DOI: 10.14529/em200119. (In Russian)
6. Agafonov A. A., Yumaganov A. S., Myasnikov V. V. E`ffektivnost` adaptivnogo upravleniya dorozhny`mi signalami v usloviyax smeshannogo potoka transportny`x sredstv // Materialy IX Mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkoly “Informacionny`e texnologii i nanotexnologii” (ITNT-2023). Samara, 2023. (In Russian)
7. Akopov A. C., Zaripov E. A., Mel`nikov A. M. Adaptivnoe upravlenie transportnoj infrastrukturoj v gorodskoj srede s ispol`zovaniem geneticheskogo algoritma veshhestvennogo kodirovaniya // Biznes-informatika. 2024. T. 18, № 2. S. 48–66. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.2.48.66. (In Russian)
8. Modelirovanie lokal`ny`x transportny`x potokov v usloviyax nepolnoty` iskhodny`x danny`x. Tekst: neposredstvenny`j / M. A. Mitroxin [i dr.] // Avtomatika na transporte. 2023. T. 9, № 4. S. 355–367. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-355-367. (In Russian)
9. Kretov A. Yu. Obzor nekotory`x adaptivny`x algoritmov svetofornogo regulirovaniya perekrestkov // Izvestiya Tul`skogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. T. 7, № 2. S. 61–67. (In Russian)
10. Xarabadzhi A. Yu. Issledovanie vliyaniya dlitel`nosti ciklov svetofornyx ob`ektov na dlinu ocheredi na smezhny`x perekrestkax // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil`no-dorozhnogo universiteta. 2017. № 4–5. S. 61–67. (In Russian)
11. Yumaganov A. S., Agafonov A. A. Optimizaciya traektorii dvizheniya transportny`x sredstv v zadache upravleniya transportny`mi potokami na perekrestke // Materialy VIII Mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkoly “Informacionny`e texnologii i nanotexnologii” (ITNT-2022). Samara, 2022. (In Russian)
12. Myasnikov V. V., Agafonov A. A., Yumaganov A. S. Determinirovannaya prognoznaya model` upravleniya signalami svetoforov v intellektual`ny`x transportny`x i geoinformacionny`x sistemax // Komp`yuternaya optika. 2021. T. 45, № 6. S. 917–925. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1031. (In Russian)
13. Analiz i modelirovanie transportny`x potokov na perekrestke dlya upravleniya kachestvom gorodskoj sredy` / T. V. Ershhenko [i dr.] // Inzhenerny`j vestnik Dona. 2022. № 8. S. 99–107. (In Russian)
14. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods // Biometrics Bulletin. 1945. Vol. 1, no. 6. P. 80–83.
15. Everitt B. The Cambridge dictionary of statistics. Cambridge University Press, 1988. 67 p.