

А.А. АГАФОНОВ, А.С. ЮМАГАНОВ  
**СОВМЕСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИГНАЛАМИ СВЕТОФОРОВ И  
ТРАЕКТОРИЯМИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

*Агафонов А.А., Юмаганов А.С. Совместное управление сигналами светофоров и траекториями движения транспортных средств.*

**Аннотация.** Транспортная система является одной из важнейших частей экономики страны. В то же время, рост интенсивности транспортного потока оказывает существенное отрицательное влияние на экономические показатели отрасли. Одним из способов повышения эффективности использования транспортной инфраструктуры является управление транспортными потоками. Решение задачи эффективного управления транспортными потоками в настоящее время часто осуществляется путем применения систем управления сигналами светофоров на регулируемых перекрестках. В связи с развитием и постепенным внедрением самоорганизующихся автомобильных сетей, позволяющих обмениваться информацией между транспортными средствами и объектами инфраструктуры, а также развитием автономных транспортных средств другим перспективным подходом к решению рассматриваемой задачи является управление траекторией движения беспилотных транспортных средств. Как следствие, становится возможной постановка задачи совместного управления траекториями движения транспортных средств и сигналами светофоров для повышения пропускной способности перекрестков, снижения потребляемого топлива и времени движения. В данной работе представлен метод управления транспортным потоком на перекрестке, заключающийся в совместном управлении сигналами светофоров и траекториями движения подключенных/автономных транспортных средств. Разработанный метод сочетает метод адаптивного управления сигналами светофоров, основанный на детерминированной модели прогнозирования движения транспортных средств, и двухэтапный алгоритм построения траектории движения транспортных средств. Целевая функция оптимизации, используемая для построения оптимальных траекторий, учитывает расход топлива, время движения по дорожной полосе и время ожидания на перекрестке. Экспериментальные исследования разработанного метода проведены в системе микроскопического моделирования движения транспортных средств SUMO с использованием трех сценариев моделирования, включающих синтетические сценарии и сценарий движения в реальной городской среде. Результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность разработанного метода по критериям потребления топлива, времени движения и времени ожидания по сравнению с методом адаптивного управления сигналами светофоров.

**Ключевые слова:** траектории движения, управление сигналами светофоров, совместное управление, детерминированная модель, интеллектуальная транспортная система.

**1. Введение.** Транспортная система является одной из самых важных отраслей экономики многих стран. Согласно данным [1] в странах Евросоюза на долю транспортной системы приходится в среднем около 5% валового внутреннего продукта (ВВП). В России в 2021 году на эту отрасль экономики пришлось 6% ВВП [2]. При этом на экономические показатели транспортной отрасли экономики существенное отрицательное влияние оказывает рост интенсивности

транспортного потока. Согласно аналитическому отчету компании INRIX [3], прогнозируемые потери экономики Великобритании вследствие заторов на дорогах к 2030 году составят 21,4 миллиарда фунтов стерлингов в год. Помимо этого, заторы на дорогах также пагубно влияют на здоровье участников движения [4], способствуют загрязнению окружающей среды [5] и повышают потребление топлива участниками движения [6]. Проблема дорожных заторов также актуальна и для России. По данным Единой межведомственной информационно-статистической системы [7], количество зарегистрированных транспортных средств в Российской Федерации за последние 10 лет увеличилось примерно на 35%. Всего в Российской Федерации на конец 2021 года зарегистрировано более 57 млн. транспортных средств [7]. Такая тенденция роста количества транспортных средств обуславливает необходимость в разработке новых эффективных средств контроля транспортного потока, в т.ч., в составе интеллектуальных транспортных систем [8].

Одним из наиболее распространенных способов решения проблем с заторами на дорогах является применение регулируемого управления на перекрестках. Существуют различные алгоритмы управления светофорами. Один из простейших подходов к управлению светофорным объектом основан на переключении фаз по фиксированному, заранее определенному расписанию. Ввиду того, что интенсивность движения транспортных средств с течением времени часто меняется, такой подход малоэффективен. Более сложные алгоритмы максимизируют пропускную способность перекрестка, используя различную информацию о текущей дорожной ситуации на прилегающих к перекрестку проезжих частях.

В связи с развитием автономных транспортных средств перспективным подходом к решению задач, связанных с эффективным контролем транспортного потока, является контроль движения подключенных беспилотных транспортных средств на регулируемых светофорами перекрестках. Использование технологии подключенных транспортных средств позволяет транспортным средствам обмениваться информацией друг с другом и с окружающей их дорожной инфраструктурой. Подобные технологии уже сейчас активно используются для обмена информацией между водителями о состоянии транспортного потока [9]. Подключенные беспилотные транспортные средства для осуществления движения могут использовать не только информацию, получаемую с различного рода собственных датчиков, но и информацию, получаемую с датчиков ближайших подключенных транспортных средств. Такая информация

также может быть использована, например, для построения надёжного кратчайшего маршрута движения транспортного средства (ТС) [10]. Таким образом, возможность беспилотного ТС осуществлять обмен информацией с другими участниками движения и дорожной инфраструктурой, позволяет безопасно управлять траекторией движения такого транспортного средства на перекрестке.

В настоящей работе представлен метод управления транспортным потоком на перекрестке, использующий совместно подход, основанный на управлении сигналами светофорного объекта, и один из перспективных подходов, основанный на управлении траекторией движения подключенных беспилотных транспортных средств. Работа построена следующим образом. Во втором разделе представлен обзор известных методов и алгоритмов управления транспортным потоком на регулируемых перекрестках. В третьем разделе введены основные понятия и обозначения, представлен предлагаемый метод совместного управления сигналами светофоров и траекториями движения транспортных средств на перекрестке. В четвертом разделе представлены результаты экспериментальных исследований разработанного метода в системе моделирования SUMO [11], продемонстрированы результаты анализа эффективности предлагаемого метода. В заключение работы приведены выводы, представлен список используемой литературы.

**2. Современное состояние исследований.** Обзор современного состояния исследований по теме совместного управления сигналами светофоров и траекториями движения транспортных средств состоит из трех этапов. На первом этапе был проведен обзор литературы, посвященный задаче построения траектории движения транспортных средств. Далее были рассмотрены основные подходы к управлению сигналами светофоров, включая детерминированные методы и методы на основе машинного обучения с подкреплением. На третьем этапе были рассмотрены работы, посвященные решению задачи совместного управления. Рассмотрим каждую задачу подробнее.

**2.1. Построение траектории движения.** На городских перекрестках транспортные средства, прибывающие на красный сигнал светофора, часто останавливаются максимально близко к стоп-линии перекрестка, а затем начинают разгоняться, когда светофор загорится зеленым. Такой характер движения увеличивает время в пути и расход топлива транспортных средств, а также снижает пропускную способность перекрестка. При соответствующем планировании траектории беспилотные транспортные средства могут заранее снизить скорость, чтобы избежать остановок и очередей у

перекрестка, снизить расход топлива. Применение методов и алгоритмов формирования траектории движения автономных подключенных транспортных средств направлено на улучшение различных характеристик транспортного потока. В качестве таких характеристик часто используются: безопасность [12], комфорт [13], эффективность [14], расход топлива [15], воздействие на окружающую среду [16].

В работах [17, 18] представлены методы построения траекторий движения автономных подключенных транспортных средств на нерегулируемых перекрестках. В рамках данной группы методов управление движением транспортных средств осуществляется не только на входящей в перекресток дорожной полосе, но и непосредственно на перекрестке. Такой подход к управлению движением транспортных средств допускает возможность резкого торможения транспортных средств с целью избегания столкновения, так как характер движения ТС до въезда в контролируемую зону перекрестка не учитывается. Так же стоит отметить, что данная группа методов не допускает наличие на перекрестке управляемых человеком транспортных средств и пешеходных переходов.

Авторы [19] предложили эвристический алгоритм, который позволяет эффективно сглаживать траектории потока транспортных средств, приближающихся к регулируемому перекрестку, путем управления их скоростью движения. Этот алгоритм формирует для каждого транспортного средства на перекрестке траекторию движения, состоящую из нескольких сегментов аналитических квадратичных кривых. Таким образом, он эффективно строит большое количество траекторий транспортных средств с учетом накладываемых физических ограничений, траекторий движения впереди идущего транспортного средства и сигналов светофорного объекта на перекрестке. В работе [12] данный алгоритм используется для построения оптимальных траекторий движения. В этой работе целевая функция оптимизации, используемая для построения оптимальных траекторий, учитывает расход топлива, время движения по дорожной полосе и безопасность движения.

Способ управления движением транспортного средства, при котором минимизируется расход топлива и негативное воздействие на окружающую среду, называют эко-вождением (eco-driving) [20]. Динамический подход к эко-вождению представлен в [21]. Авторы разработали алгоритм формирования тригонометрического профиля скорости транспортного средства. Данный алгоритм не только минимизирует расход топлива и количество выбросов углекислого

газа в атмосферу, но и не допускает резкого торможения/ускорения, что способствует повышению комфорта езды. В [20] разработана модель эко-вождения для гибридных электромобилей в условиях перегруженного городского движения. При формировании траектории движения транспортных средств данная модель учитывает прогнозируемую загруженность перекрестка.

В данной работе в качестве алгоритма построения траектории движения транспортных средств на регулируемом перекрестке используется модифицированный вариант алгоритма [19]. Данный алгоритм позволяет эффективно строить траектории движения транспортных средств на полосах движения, прилегающих к регулируемым перекресткам различного вида и набора фаз светофорного цикла, что позволяет использовать алгоритм в сложных транспортных сетях, приближенных к реальным.

**2.2. Управление сигналами светофоров.** Одной из первых работ, посвященных проблеме управления сигналами/фазами светофорного объекта, можно считать работу Вебстера [22]. В работе был предложен метод расчета длины светофорного цикла и фазового цикла для одиночного перекрестка. Развитие метода для использования стратегий координированного управления несколькими перекрестками было продолжено в [23, 24]. Ранние методы управления светофорами использовали так называемые стратегии с фиксированным временем, при которых длительность светофорного цикла и распределение фаз фиксировались и не зависели от состояния движения на сегментах сети, что ограничивает применимость моделей [25].

Следующим этапом развития методов управления светофорами было применение адаптивных схем управления, зависящих от наблюдаемого транспортного потока на перекрестке. Такие схемы позволяют выбирать новую фазу светофорного цикла в зависимости от, например, длины очереди транспортных средств на перекрестке [26]. В [27] авторы предложили адаптивную схему управления, учитывающую введенную величину «давления», которая определяется как разность между количеством въезжающих и выезжающих транспортных средств на перекрестке. Данный метод, согласно работе [28], смог превзойти более современные подходы на небольшой синтетической сети. В [29] был предложен адаптивный алгоритм управления, основанный на выборе фазы светофорного цикла, прогнозируемый транспортный поток для которой будет максимальным.

В последнее десятилетие широкое развитие получили методы машинного обучения и глубокие нейронные сети. Применительно к задаче управления сигналами светофоров, в современных исследованиях активно разрабатываются методы на основе обучения с подкреплением (reinforcement learning – RL) [30 – 39]. Обучение с подкреплением – это класс методов машинного обучения (наряду с методами обучения с учителем и обучения без учителя), обучающихся в процессе взаимодействия агента с окружающей средой с целью максимизации некоторого вознаграждения. В ходе взаимодействия агент получает наблюдаемое состояние среды, выполняет некоторое действие в соответствии с настроенной функцией политики и переходит в следующее состояние. После перехода в новое состояние агент получает численное вознаграждение и обновляет свою функцию политики с целью достижения оптимальной политики и максимизации общего вознаграждения.

В качестве основных RL-методов для решения задачи управления сигналами светофоров часто используются следующие: методы на основе оптимизации функции полезности (Q-обучение [30], глубокое Q-обучение [31], двойное Q-обучение [32, 33]), методы на основе оптимизации политики [34 – 37], методы класса «actor-critic», сочетающие оба подхода [38, 39]. Обзор и сравнение различных RL-методов и алгоритмов, а также используемых настроек алгоритмов (описания наблюдаемого состояния среды, функции вознаграждения) представлен в [40, 41]. В [42] авторы провели обзор основных приложений RL-методов в разработке современных интеллектуальных транспортных систем, включая задачи управления светофорами, контроля электроэнергии и автономного вождения.

Несмотря на активное развитие RL-методов управления сигналами светофоров, остаются открытыми вопросы обучения моделей и сходимости к глобальному максимуму, чувствительности к выбору гиперпараметров алгоритмов, стабильности их работы на сложных сценариях управления. В данной работе в качестве метода управления был выбран детерминированный метод на основе максимизации прогнозируемого потока транспортных средств [29]. Исходя из результатов, представленных в оригинальной работе, данный метод превосходит классические алгоритмы управления сигналами светофоров и современный RL-метод.

**2.3. Совместное управление.** Заключительная часть обзора современного состояния исследований посвящена анализу литературы, рассматривающей задачу координированного управления движением

автономных/подключенных транспортных средств и сигналами светофоров.

Один из методов построения траекторий движения транспортных средств в смешанном транспортном потоке представлен в [43]. Однако представленный подход использовал предопределенный светофорный цикл. В [44] предлагается система, которая включает в себя как управление сигналами светофоров, так и управление траекториями движения транспортных средств. Предлагаемая структура объединяет компоненты восприятия, прогнозирования, планирования и оптимизации и направлена на повышение эффективности управления смешанным транспортным потоком. Однако в алгоритме не предполагалась смена полос движения, а экспериментальные исследования алгоритма проводились на сценарии, содержащем один изолированный перекресток. В [45] обобщены методы управления сигналами светофоров, активного управления автономными подключенными транспортными средствами и косвенного управления обычными транспортными средствами для изучения стратегии координированного управления несколькими перекрестками для гетерогенного транспортного потока. Согласно [46], решение задачи координированного управления позволит значительно повысить эффективность использования транспортной инфраструктуры.

В данном исследовании представлен метод совместного управления траекториями движения и адаптивного управления сигналами светофоров. Постановка задачи и описание разработанного алгоритма представлены в следующем разделе.

**3. Метод совместного управления.** Задача, решаемая разработанным методом совместного управления транспортным потоком на регулируемом перекрестке, формулируется следующим образом:

$$\lambda \cdot R_T (TravelT_{\Sigma}(A_{TS}, A_{Tr})) + \eta \cdot R_T (WaitingT_{\Sigma}(A_{TS}, A_{Tr})) + \delta \cdot R_F (FuelC_{\Sigma}(A_{TS}, A_{Tr})) \rightarrow \min_{A_s, A_r}$$

где  $TravelT_{\Sigma}(A_{TS}, A_{Tr})$  – общее время (длительность) совершения всех корреспонденций ТС на перекрестке,  $WaitingT_{\Sigma}(A_{TS}, A_{Tr})$  – общее время (длительность) ожидания всех ТС на перекрестке;  $FuelC_{\Sigma}(A_{TS}, A_{Tr})$  – объем общего потребления топлива всеми ТС при

движении по перекрёстку;  $R_T$  – скалярная функция, возвращающая вещественное (безразмерное) число, равное в секундах задаваемой аргументом длительности времени;  $R_F$  – скалярная функция, возвращающая вещественное (безразмерное) число, равное в миллилитрах задаваемому аргументом объёму потребленного топлива;  $A_{TS}, A_{Tr}$  – используемые алгоритмы управления сигналами светофоров и построения траектории движения (включая их параметры);  $\lambda, \eta, \delta$  – вещественные безразмерные весовые коэффициенты, совместно характеризующие относительную важность того или иного фактора. Для решения данной задачи согласованно используются метод адаптивного управления сигналами светофоров и алгоритм построения траекторий движения транспортных средств.

Для описания метода совместного управления сигналами светофоров и траекториями движения транспортных средств последовательно рассмотрим метод адаптивного управления сигналами светофоров (раздел 3.1), алгоритм построения траекторий движения транспортных средств (раздел 3.2), а также метод их совместного применения.

### 3.1. Метод адаптивного управления сигналами светофоров

$A_{TS}$ . Для решения задачи адаптивного управления сигналами светофоров в работе используется метод максимального взвешенного потока (MaxPWFlow) [29, 46], предложенный авторами настоящей работы. Метод управления основывается на выборе фазы светофорного цикла, максимизирующей прогнозируемый поток транспортных средств, проходящих через перекресток за рассматриваемый временной интервал. Представим краткое формальное описание используемого метода.

Введем следующие обозначения. Пусть  $\tau_{min}$  – допустимый минимальный интервал переключения фаз,  $t_p$  – длительность текущей активной фазы светофорного объекта  $p \in P$ ,  $P$  – множество фаз, *phase* – следующая выбранная фаза.

Тогда в виде псевдокода алгоритм может быть представлен следующим образом (листинг 1).

Основным шагом метода является расчет прогнозируемого «взвешенного» потока транспортных средств через перекресток для заданной фазы  $p \in P$ , выполняемый функцией  $PWFlow(p)$ .



**Входные данные:**  $\tau_{min}, t_p, p, P$   
**Выходные данные:**  $phase$   
 if  $t_p < \tau_{min}$  then  
    $t_p = t_p + 1$   
    $phase = p$   
 else  
    $t_p = 0$   
    $phase = \operatorname{argmax}(\{PWFlow(p) \text{ for } p \text{ in } P\})$   
 end if

Листинг 1. Метод максимального взвешенного потока

В работе [46] используется следующий вид функции:

$$PWFlow(phase) = \sum_{l \in L_{phase}^{income}} \sum_{c \in C_l} \eta(c, l) I(t(c) < \tau_{min}). \quad (1)$$

В формуле (1)  $t(c)$  – оценка времени, необходимого транспортному средству  $c \in C_l$  для достижения перекрестка.  $C_l$  – множество транспортных средств, движущихся по полосе  $l$  из множества полос  $L_{phase}^{income}$ , движение по которым разрешено при активной фазе  $phase$  светофорного объекта.  $I(val)$  – индикатор, который возвращает значение 1, если  $val = True$ , и значение 0 в противном случае. Оценка времени движения  $t(c)$  формируется с использованием детерминированной прогнозной модели движения [29].

Учет времени ожидания  $delay(c, l)$  транспортного средства  $c$  на полосе  $l$  осуществляется путем корректировки «веса»  $\eta(c, l)$  в итоговой оценке  $PWFlow(phase)$ :

$$\eta(c, l) = 1 + \alpha \cdot delay(c, l),$$

где  $\alpha = 0,01$  – эмпирически выбранный коэффициент (единица измерения времени ожидания – секунда).

В следующем подразделе приведено описание алгоритма построения траектории движения транспортного средства.

**3.2. Алгоритм построения траектории  $A_{tr}$ .** Пусть траектория – это квадратичная дифференцируемая функция  $tr(t)$ , для которой производная первого порядка (скорость)  $tr'(t)$  является абсолютно непрерывной функцией и правая производная второго порядка (ускорение)  $tr''(t)$  является интегрируемой.

Пусть контролируемое ТС въезжает на смежную с перекрестком полосу движения в момент времени  $t_0$  со скоростью  $v_0$  в позицию  $l_0$ ;  $L$  – длина полосы движения;  $v_{\max}$  – максимальная допустимая скорость движения на рассматриваемой полосе движения;  $\bar{a}$  – максимальное ускорение, с которым может двигаться рассматриваемое ТС;  $\underline{a}$  – максимальное торможение, достижимое рассматриваемым ТС. Пусть перекресток управляется светофорным объектом с фиксированным временем переключения фаз. Требуется построить физически достижимую и безопасную траекторию движения ТС до перекрестка  $tr$  с учетом следующих ограничений:

$$\begin{aligned} tr(t_0) &= l_0, \\ 0 \leq tr'(t) &\leq v_{\max}, \quad \underline{a} \leq tr''(t) \leq \bar{a}, \quad \forall t \in (-\infty, +\infty), \\ G(T(tr, L)) &= T(tr, L), \end{aligned}$$

где  $T(tr, L)$  – время, при котором ТС достигнет позиции  $L$  (т.е. въедет на перекресток), двигаясь по траектории  $tr$ ;  $G(t)$  – функция, которая возвращает ближайшее к  $t$  время зеленой фазы светофора ( $G(t) = t$ , если в момент времени  $t$  горит зеленый сигнал светофора,  $G(t) > t$ , если в момент времени  $t$  горит красный). Функция  $G(t)$  определяется следующим образом:

$$G(t) = \min\{t' : t' > t \wedge t' \in [T_0 + nT_c, T_0 + nT_c + T_g], n \in \mathbb{Z}^+\},$$

где  $\mathbb{Z}^+$  – множество целых положительных чисел,  $T_0$  – время начала светофорного цикла,  $T_c = T_g + T_y + T_r$  – длительности полного

рабочего цикла светофора, которое включает в себя длительности зеленой фазы  $T_g$ , желтой фазы  $T_{yr}$  и красной фазы  $T_r$ .

Для управления движением ТС на перекрестке в работе используется модифицированный вариант Shooting Heuristic алгоритма [19]. В рамках оригинального Shooting Heuristic алгоритма для каждого ТС, находящегося на смежной с контролируемым перекрестком дорожной полосе, строится траектория движения, учитывающая траекторию впереди идущего ТС (при наличии такового). В рамках разработанного метода траектория формируется только для ближайшего к перекрестку ТС на дорожной полосе. Остальные ТС двигаются согласно используемой модели следования за контролируемым ТС. В данной работе в качестве такой модели следования применяется используемая по умолчанию в системе моделирования SUMO модель [47].

На первом этапе Shooting Heuristic алгоритма под названием Forward Shooting Process (FSP), последовательно формируются два сегмента траектории. Первый сегмент соответствует равноускоренному движению с ускорением  $\bar{a}^f \in (0, \bar{a}]$  из начального состояния  $(t_0, v_0, l_0)$  до достижения крейсерской скорости  $v_{cruise} \in (0, v_{max}]$ . Движение по этому сегменту траектории занимает  $(v_{cruise} - v_0) / \bar{a}^f$  секунд. Второй сегмент траектории соответствует равномерному прямолинейному движению со скоростью  $v_{cruise}$  с момента времени  $t_0 + (v_{cruise} - v_0) / \bar{a}^f$  до момента въезда непосредственно на перекресток. В результате ТС, двигаясь по рассматриваемому сегменту, въедет на перекресток в момент времени  $\hat{t}^+$ , определяемый следующим образом:

$$\hat{t}^+(v_{cruise}, \bar{a}^f) = t_0 + \begin{cases} \frac{-v_0 - \sqrt{(v_0)^2 + 2\bar{a}^f L}}{\bar{a}^f}, & \text{если } L \leq \frac{v_{cruise}^2 - (v_0)^2}{2\bar{a}^f} \\ \frac{L}{v_{cruise}} + \frac{(v_{cruise} - v_0)^2}{2\bar{a}^f v_{cruise}}, & \text{иначе} \end{cases}.$$

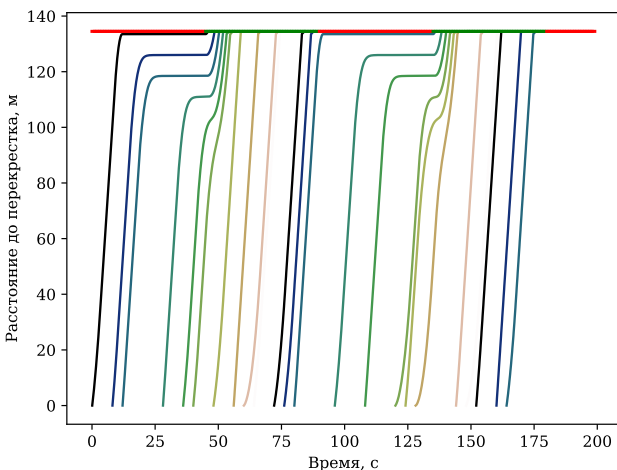
Полученная траектория  $tr^f$ , состоящая из двух сегментов, является результирующей, если в момент времени  $\hat{t}^+$  для полосы движения, по которой движется рассматриваемое ТС, горит зеленый

сигнал светофора. В противном случае при  $G(T(tr^f, L)) \neq T(tr^f, L)$  начинается второй этап алгоритма – Backward Shooting Process (BSP).

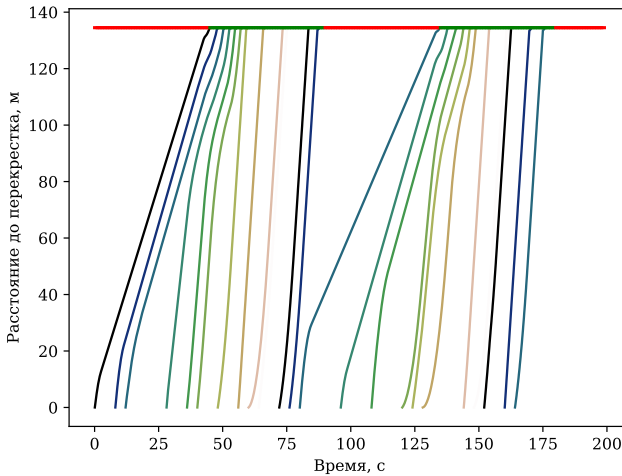
В начале второго этапа алгоритма последний сегмент траектории  $tr^f$  сдвигается вправо по оси времени до начала зеленой фазы светофора  $G(\hat{t}^+)$ . Полученный в результате такого сдвига сегмент является исходным для этапа BSP. Затем из этого исходного сегмента формируются сегменты траектории  $tr^b$  с ускорением  $\bar{a}^b \in (0, \bar{a})$  и торможением  $\underline{a}^b \in [\bar{a}, 0)$ , благодаря которым траектории  $tr^b$  и  $tr^f$  плавно соединяются в результирующую траекторию  $tr$ .

Таким образом, используемая в работе модификация Shooting Heuristic алгоритма последовательно формирует траектории для ТС, расположенных наиболее близко к перекрестку на каждой входящей дорожной полосе. Набор параметров  $(\bar{a}^f, \bar{a}^b, \underline{a}^b, v_{cruise})$ , используемый для построения траектории, определяет ее "гладкость". Следует отметить, что при заданном наборе входных параметров траектории  $(\bar{a}^f, \bar{a}^b, \underline{a}^b, v_{cruise})$  и исходных данных положения ТС  $(t_0, v_0, l_0)$  не всегда представляется возможным построить траекторию с помощью алгоритма Shooting Heuristic.

Пример построения траекторий с помощью Shooting Heuristic алгоритма представлен на рисунке 1.



а)



б)

Рис. 1. Пространственно-временные диаграммы движения: а) управляемых вручную транспортных средств; б) с помощью Shooting Heuristic алгоритма

На данном рисунке показаны две пространственно-временные диаграммы, содержащие траектории движения транспортных средств на регулируемом перекрестке, контролируемых вручную (а), и транспортных средств, управляемых с помощью Shooting Heuristic алгоритма (б).

Полученную с помощью Shooting Heuristic алгоритма траекторию можно оценить по различным показателям эффективности дорожного движения. В рамках предложенного в данной работе метода была использована взвешенная сумма нескольких критериев оценки траектории:

$$M(tr) = \lambda \cdot R_T(TravelT(tr)) + \eta \cdot R_T(WaitingT(tr)) + \delta \cdot R_F(FuelC(tr)),$$

где  $TravelT(tr)$  – время (длительность) совершения корреспонденции ТС при движении по траектории  $tr$ ,  $WaitingT(tr)$  – время (длительность) ожидания/простоя ТС при движении по траектории  $tr$ ;  $FuelC(tr)$  – объем потребления топлива ТС при движении по траектории  $tr$ . Скалярные функции  $R_T$  и  $R_F$  определены ранее, также как и как весовые коэффициенты  $\lambda, \eta, \delta$ . Значения последних

были подобраны экспериментально:  $\lambda = 1, 0$ ;  $\eta = 2, 0$ ;  $\delta = 1, 0$ . Поскольку в качестве единиц измерения времени движения ТС и времени ожидания ТС использовались секунды, в качестве единиц потребления топлива – миллилитры, чем меньше значение оценки  $M(tr)$  для траектории  $tr$ , тем «лучше» траектория.

Для расчета потребления топлива была использована модель расчета потребления топлива, основанная на данных из базы данных The Handbook Emission Factors for Road Transport (НБЕФА) версии 3.1. Данная модель используется по умолчанию в системе моделирования SUMO для расчета выбросов в атмосферу и потребления топлива транспортных средств. Согласно модели потребление топлива транспортным средством стандарта Евро-4 с бензиновым двигателем, движущимся со скоростью  $v$  ( $м/с$ ) и ускорением  $a$  ( $м/с^2$ ) в момент времени  $t$  ( $с$ ) рассчитывается по следующей формуле [11]:

$$FuelC(tr(t)) = \begin{cases} 0, & \text{если } tr''(t) < 0 \\ \frac{3014 + tr'(t)(299,3tr''(t) - 149 + 9,014tr'(t))}{2671,2}, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Для подбора оптимальных параметров траектории  $(\bar{a}^f, \bar{a}^b, \underline{a}^b, v_{cruise})$  использовался субградиентный метод [12]. Задача оптимизации формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} M(tr(\bar{a}^f, \bar{a}^b, \underline{a}^b, v_{cruise})) &\rightarrow \min_{\bar{a}^f, \bar{a}^b, \underline{a}^b, v_{cruise}}, \\ 0 < \bar{a}^f &\leq \bar{a}, 0 < \bar{a}^b \leq \bar{a}, \\ \underline{a} &\leq \underline{a}^b < 0, 0 \leq v_{cruise} \leq v_{\max}. \end{aligned}$$

На первом этапе данного метода выбирается такой набор параметров  $(\bar{a}^f, \bar{a}^b, \underline{a}^b, v_{cruise})$ , при котором с помощью алгоритма Shooting Heuristic можно построить траекторию. Выбор начального набора параметров осуществляется путем перебора. Затем рассчитывается субградиент путем небольшого изменения текущих входных параметров используемого алгоритма построения траектории. Далее рассчитывается оценка траектории при изменении параметров в субградиентном направлении. Движение в направлении градиента выполняется до тех пор, пока не будет найдена точка решения, которая

приводит к значительному уменьшению значения функции оценки  $M$ . Если такая точка найдена, вектор входных параметров изменяется путем перемещения в эту новую точку. В противном случае алгоритм может застрять в локальном оптимуме, поэтому в этом случае вектор входных параметров просто перемещается в ближайшую точку, даже если значение функции оценки не уменьшается. Этот процесс поиска вектора входных параметров повторяется до тех пор, пока не будут удовлетворены определенные конечные критерии (максимальное количество шагов при движении по градиенту). Во время этого процесса всякий раз, когда вычисляется оценка траектории в новой точке, оптимальное решение (в виде набора параметров  $(\bar{a}^f, \bar{a}^b, \underline{a}^b, v_{cruise})$ ) обновляется в том случае, если оценка траектории в этой точке, меньшее, чем все предыдущие оценки.

Общая схема используемого в данной работе алгоритм построения оптимальной траектории движения ТС представлена на рисунке 2.

**3.3. Метод совместного управления.** В рамках предлагаемого метода совместного управления на перекрестке управление светофорным объектом осуществляется описанным в разделе 3.1 методом адаптивного управления. Траектория движения транспортных средств на входящих к перекрестку дорожных полосах формируется с помощью алгоритма, описанного в разделе 3.2. Однако, для согласованной работы вышеназванного метода и алгоритма, алгоритм построения траектории был адаптирован для работы со светофорным объектом, контролируемым адаптивным методом.

Для возможности применения алгоритма 3.2 на перекрестке, управляемым светофорным объектом, работающем без фиксированного расписания, была изменена функция  $G(t)$ . Как было отмечено выше, эта функция для заданного момента времени  $t$  возвращает следующее ближайшее к нему время зеленой фазы светофора. Она используется в описанном ранее алгоритме Shooting Heuristic на этапе BSP. Так как длительность полного цикла работы светофора при использовании метода, описанного в разделе 3.1, непостоянно, использовать определение функции (2) не представляется возможным.

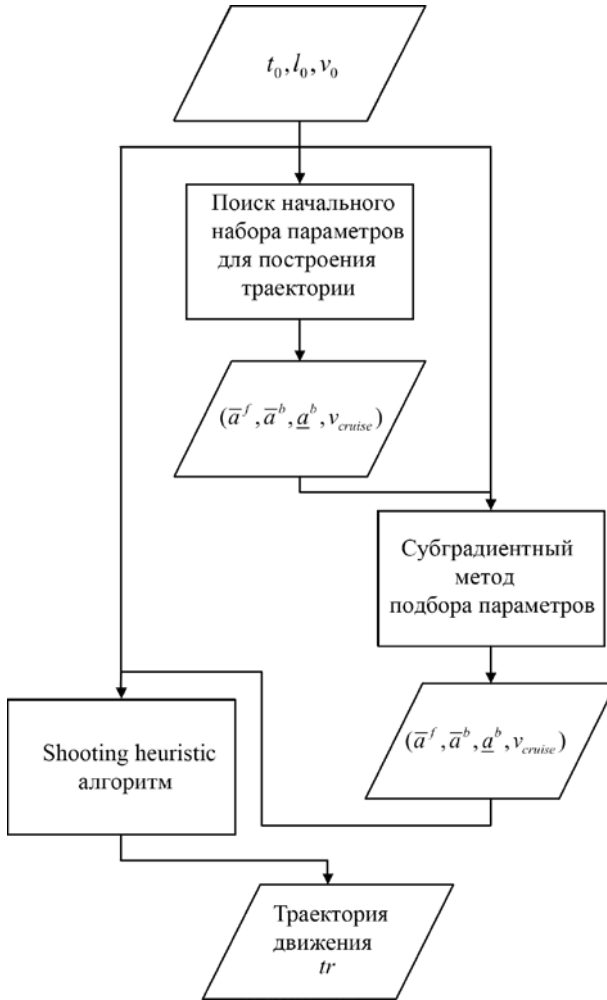


Рис. 2. Общая схема алгоритма построения оптимальной траектории движения ТС

Пусть  $p$  – текущая активная фаза светофора для входящей в перекресток полосы движения;  $p$  – следующая прогнозируемая фаза светофора;  $\tau_{min}$  – минимальный интервал переключения фаз;  $T_o^p$  – время начала текущей фазы,  $T_o^{pnext} = T_o^p + \tau_{min}$  – время



переключения фазы;  $c(p, l) \in \{green, yellow, red\}$  – сигнал светофоры фазы  $p$  для полосы движения  $l$ . Тогда, по аналогии с  $G(t)$ , определим функцию  $G(t, p, l)$  следующим образом:

$$G(t, p, l) = \begin{cases} t, & \text{if } c(p, l) = green \wedge (c(p_{next}, l) = green \vee t < T_o^{pnext}) \\ \max\{t, T_o^{pnext}\}, & \text{if } c(p, l) \neq green \wedge c(p_{next}, l) = green. \\ \max\{t, T_o^{pnext} + \tau_{min}\}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Согласно используемому методу адаптивного управления сигналами светофорного объекта, выбор и установка следующей фазы осуществляется через фиксированный временной интервал  $\tau_{min}$  по формуле:

$$p_{next} = \operatorname{argmax}(\{PWFlow(p) \text{ for } p \text{ in } P\}). \quad (2)$$

Значение фазы  $p_{next}$  является «прогнозируемым», так как построение траектории может осуществляется в те моменты времени, когда установка следующей фазы светофора не выполняется.

Для совместного управления транспортным потоком на перекрестке предлагается обновлять сформированные траектории движения ТС, при изменении результата прогноза следующей фазы светофора. В результате построения траектории сохраняется не только непосредственно построенная траектория для ТС, но и результат прогноза следующей фазы светофора, при котором эта траектория была получена. Обновление траекторий движения ТС осуществляется с заданной периодичностью  $\tau_{upd} < \tau_{min}$ .

Обновление траекторий осуществляется следующим образом. Сначала по формуле (2) вычисляется прогнозируемая фаза светофорного объекта  $p_{next}$  для момента следующего переключения его фазы. Затем для построенной ранее траектории ТС выполняется проверка, изменился ли прогноз следующей фазы. Тогда, если прогноз для ТС на дорожной полосе  $l$  поменялся ( $c(p, l) \neq c(p_{next}, l)$ ), то траектория перестраивается (с использованием алгоритма построения траектории, описанного в разделе 3.2 – функция  $build\_traj()$ ) с учетом обновленного прогноза для следующей фазы. В противном случае, траектория движения ТС остается неизменной. С учетом сказанного

выше псевдокод процедуры обновления траектории ТС выглядит следующим образом (листинг 2):

**Входные данные:**  $l, p, tr, P$

**Выходные данные:**  $tr, p_{next}$

$p_{next} = \operatorname{argmax}(\{PWFlow(p) \text{ for } p \text{ in } P\})$

if  $c(p, l) \neq c(p_{next}, l)$  then

$tr = \text{build\_traj}(p_{next})$

end if

Листинг 2. Процедура обновления траектории

**4. Экспериментальные исследования.** Экспериментальные исследования эффективности разработанного метода проводились с использованием системы моделирования SUMO (Simulation of Urban Mobility) [10]. Эта система моделирования с открытым исходным кодом, развиваемая более 20 лет, предназначена для моделирования мультимодального движения транспортных средств в крупномасштабных транспортных сетях.

В экспериментах проводилось сравнение метода совместного управления сигналами светофоров и траекториями движения транспортных средств с методом адаптивного управления сигналами светофоров MaxPWFlow (без управления движением транспортных средств). Разработка алгоритмов и методов совместного управления является областью активных исследований. Существующие работы обладают существенными ограничениями: используют предопределенный цикл фаз [43] или не рассматривают перестроение между полосами в процессе движения [44], а также не предоставляют исходный код и данные для сравнения. Эти особенности делают невозможным сравнение разработанного метода с существующими алгоритмами и методами того же класса.

Экспериментальные исследования проводились при шаге симуляции, равном 0,1 секунде, и при общем времени симуляции 3600 секунд. Для оценки эффективности разработанного метода использовались три сценария моделирования движения транспортных средств:

– изолированный перекресток, являющийся пересечением равнозначных однополосных дорог длиной 150 метров. Количество транспортных средств – 900;

– синтетическая сеть «4х4», состоящая из 16 перекрестков одинаковой структуры: пересечение равнозначных дорог длиной 300

метров с 3 полосами движения. Количество транспортных средств – 1472;

– городская область, являющаяся частью крупномасштабного сценария моделирования «TAPAS Cologne» [48]. Сценарий содержит 8 регулируемых перекрестков различной топологии, количество транспортных средств – 2046.

Дорожные сети рассматриваемых сценариев представлены на рисунке 3.

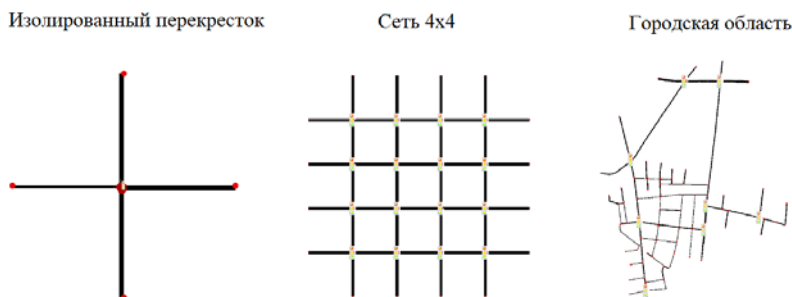


Рис. 3. Сценарии моделирования движения ТС

В ходе проведения экспериментальных исследований все транспортные средства имели одинаковые характеристики, бензиновый двигатель и соответствовали одному экологическому стандарту – Евро-4.

В экспериментах использовались следующие значения параметров: минимальный интервал переключения фаз  $\tau_{min} = 10$  (секунд), интервал обновления траектории движения транспортного средства  $\tau_{upd} = 5$  (секунд).

Сравнение методов проводилось по трем критериям:

– средний расход топлива на одно транспортное средство (основной критерий) (в миллилитрах), позволяющий оценить потребление топлива всеми транспортными средствами в сценарии.

– среднее время движения одного транспортного средства (в секундах), затрачиваемое транспортными средствами на совершение поездок в сети;

– среднее время ожидания одного транспортного средства (в секундах), т.е. время, которое транспортное средство провело без движения на перекрестке.

Для оценки показателей качества методов для каждого сценария было проведено 10 запусков моделирования движения транспортных средств (10 эпизодов), полученные результаты были усреднены. Начальные положения транспортных средств, время начала движения и маршруты были различными в различных эпизодах одного сценария. Результаты сравнения методов по критерию «расход топлива» представлены в таблице 1, по критерию «среднее время движения» – в таблице 2, по критерию «среднее время ожидания» – в таблице 3.

Таблица 1. Сравнение методов по критерию «средний расход топлива», мл

	Изолированный перекресток	Сеть 4x4	Городская область
MaxPWFlow	35,45	115,47	87,92
Совместное управление	<b>30,56</b>	<b>111,98</b>	<b>86,47</b>

Таблица 2. Сравнение методов по критерию «среднее время движения», с

	Изолированный перекресток	Сеть 4x4	Городская область
MaxPWFlow	27,07	104,81	88,84
Совместное управление	<b>25,56</b>	<b>103,4</b>	<b>87,23</b>

Таблица 3. Сравнение методов по критерию «среднее время ожидания», с

	Изолированный перекресток	Сеть 4x4	Городская область
MaxPWFlow	2,01	3,61	3,57
Совместное управление	<b>0,04</b>	<b>1,16</b>	<b>1,44</b>

Проведенные эксперименты подтверждают эффективность предложенного метода совместного управления сигналами светофоров и траекториями движения транспортных средств по всем рассмотренным критериям.

На рисунке 4 представлен расход топлива для каждого эпизода моделирования в сценарии «городская область».

Как видно из графика, предложенный метод позволил снизить потребление топлива в каждом из эпизодов рассматриваемого сценария.

Основываясь на результатах проведенных экспериментов, можно сделать вывод, что предложенный в работе метод совместного управления позволяет повысить эффективность использования

транспортной инфраструктуры, снизить расход топлива и время движения.

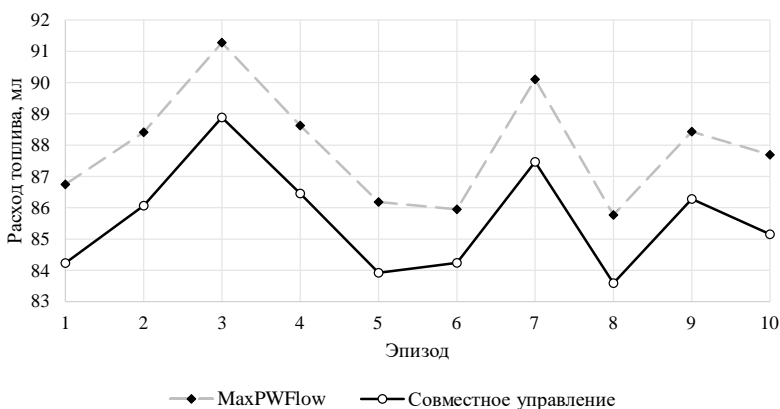


Рис. 4. Расход топлива в каждом эпизоде моделирования движения

**4. Заключение.** В работе представлен метод совместного (координированного) управления сигналами светофоров и траекториями движения транспортных средств. В рамках предложенного метода управление светофорным объектом осуществляется методом максимального взвешенного потока, построение траекторий – модифицированным Shooting Heuristic алгоритмом. Совместная работа достигается путем обновления траектории движения транспортных средств при смене результата прогноза следующей фазы светофора. Экспериментальные исследования в системе моделирования движения транспортных средств подтверждают эффективность предложенного метода по критериям потребления топлива, времени движения и времени ожидания на синтетических и реальных сценариях движения.

Возможные направления исследований включают в себя адаптацию других известных алгоритмов построения траектории движения транспортных средств для совместной работы с используемым в работе адаптивным методом управления сигналами светофоров, и исследование эффективности разработанного метода на крупномасштабном сценарии моделирования движения транспортных средств.

**Литература**

1. Transport sector economic analysis // EU Science Hub. URL: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/transport-sector-economic-analysis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/transport-sector-economic-analysis_en). (дата обращения: 30.05.2022).
2. О производстве и использовании валового внутреннего продукта (ВВП) в 2021 году // Официальный сайт федеральной службы государственной статистики. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/59\\_08-04-2022.htm](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/59_08-04-2022.htm). (дата обращения: 30.05.2022).
3. Traffic congestion to cost the UK economy more than £300 billion over the next 16 years // Inrix. 2014. URL: <https://inrix.com/press-releases/traffic-congestion-to-cost-the-uk-economy-more-than-300-billion-over-the-next-16-years/>. (дата обращения: 30.05.2022).
4. Requia W.J. et al. The health impacts of weekday traffic: A health risk assessment of PM 2.5 emissions during congested periods // Environment international. 2018. vol. 111. pp. 164–176.
5. Zhang K., Batterman S. Air pollution and health risks due to vehicle traffic // The Science of the total environment. 2013. vol. 450–451. pp. 307–316.
6. Li X. et al. Stop-and-go traffic analysis: Theoretical properties, environmental impacts and oscillation mitigation // Transportation Research Part B: Methodological. 2014. vol. 70. pp. 319–339.
7. Наличие автомобильного транспорта // Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <https://fedstat.ru/indicator/36228>. (дата обращения: 30.05.2022).
8. ГОСТ Р 56829-2015 Интеллектуальные транспортные системы. Термины и определения // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200128315>. (дата обращения: 20.07.2022).
9. Как работают Яндекс.Пробки // Яндекс. URL: <https://yandex.ru/company/technologies/yarprobki/>. (дата обращения: 30.05.2022).
10. Агафонов А.А., Мясников В.В. Метод определения надежного кратчайшего пути в стохастической сети с использованием параметрически заданных устойчивых распределений вероятностей // SPIIRAS Proc. 2019. Т. 18. № 3. С. 558–582.
11. Lopez P.A. et al. Microscopic Traffic Simulation using SUMO Maui, HI: IEEE, 2018. pp. 2575–2582.
12. Ma J. et al. Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part II: Computational issues and optimization // Transportation Research Part B: Methodological. 2017. vol. 95. pp. 421–441.
13. Hu J. et al. Integrated optimal eco-driving on rolling terrain for hybrid electric vehicle with vehicle-infrastructure communication // Transportation research. Part C: Emerging technologies. 2016. vol. 68. pp. 228–244.
14. Asadi B., Vahidi A. Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time // IEEE transactions on control systems technology: a publication of the IEEE Control Systems Society. 2011. vol. 19. no. 3. pp. 707–714.
15. Zhang H. et al. A priority-based autonomous intersection management (AIM) scheme for connected automated vehicles (CAVs) // Vehicles. 2021. vol. 3. no. 3. pp. 533–544.
16. Jiang H et al. Eco approaching at an isolated signalized intersection under partially connected and automated vehicles environment // Transportation research. Part C: Emerging technologies. 2017. vol. 79. pp. 290–307.

17. Lee J., Park B. Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment // *IEEE transactions on intelligent transportation systems: a publication of the IEEE Intelligent Transportation Systems Council*. 2012. vol. 13. no. 1. pp. 81–90.
18. Yu C. et al. Managing connected and automated vehicles at isolated intersections: From reservation- to optimization-based methods // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. vol. 122. pp. 416–435.
19. Zhou F., Li X., Ma J. Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part I: Theoretical analysis with generalized time geography // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. vol. 95. pp. 394–420.
20. Yang Z. et al. Eco-trajectory planning with consideration of queue along congested corridor for hybrid electric vehicles // *Transportation research record*. 2019. vol. 2673. no. 9. pp. 277–286.
21. Barth M. et al. Dynamic ECO-driving for arterial corridors // *IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*. 2011. pp. 182–188.
22. Webster F.V. Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper / Stationery Office, 1958. no 39.
23. Little J., Kelson M., Gartner N. MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 1981. vol. 795. pp. 40–46.
24. Li M.-T., Gan A.C. Signal timing optimization for oversaturated networks using TRANSYT-7F // *Transportation Research Record*. 1999. № 1683. pp. 118–126.
25. Papageorgiou M. et al. Review of road traffic control strategies // *Proceedings of the IEEE*. 2003. vol 12. no. 91. pp. 2043–2065.
26. El-Tantawy S., Abdulhai B. An agent-based learning towards decentralized and coordinated traffic signal control 2010. pp. 665–670.
27. Varaiya P. The Max-Pressure Controller for Arbitrary Networks of Signalized Intersections Complex Networks and Dynamic Systems // *Complex Networks and Dynamic Systems*. New York, NY: Springer New York, 2013. pp. 27–66.
28. Genders W., Razavi S. An Open-Source Framework for Adaptive Traffic Signal Control // *arXiv:1909.00395*. 2019.
29. Мясников В.В., Агафонов А.А., Юмаганов А.С. Детерминированная прогнозная модель управления сигналами светофоров в интеллектуальных транспортных и геoinформационных системах // *Компьютерная оптика*. 2021. Т. 45. № 6. С. 917–925.
30. Abdulhai B., Pringle R., Karakoulas G. Reinforcement Learning for True Adaptive Traffic Signal Control // *Journal of Transportation Engineering*. 2003. (129).
31. Wei H. et al. IntelliLight: A Reinforcement Learning Approach for Intelligent Traffic Light Control London United Kingdom: ACM, 2018. pp. 2496–2505.
32. Wang X. et al. Large-Scale Traffic Signal Control Using a Novel Multiagent Reinforcement Learning // *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2021. vol. 1. no. 51. pp. 174–187.
33. Agafonov A., Myasnikov V. Traffic Signal Control: A Double Q-learning Approach 2021. pp. 365–369.
34. Schulman J. et al. Proximal Policy Optimization Algorithms // *arXiv:1707.06347*. 2017.
35. Ault J., Hanna J.P., Sharon G. Learning an Interpretable Traffic Signal Control Policy // *arXiv:1912.11023*. 2020.
36. Li Y., He J., Gao Y. Intelligent Traffic Signal Control with Deep Reinforcement Learning at Single Intersection. 2021. pp. 399–406.

37. Yang J., Zhang J., Wang H. Urban Traffic Control in Software Defined Internet of Things via a Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. vol. 6. no 22. pp. 3742–3754.
38. Yang S. et al. IHG-MA: Inductive heterogeneous graph multi-agent reinforcement learning for multi-intersection traffic signal control // Neural Networks. 2021. vol 139. pp. 265–277.
39. Haarnoja T. et al. Soft Actor-Critic Algorithms and Applications // arXiv:1812.05905. 2019.
40. Yau K.-L.A. et al. A survey on Reinforcement learning models and algorithms for traffic signal control // ACM Computing Surveys. 2017. vol. 3. 50 p.
41. Wei H. et al. A Survey on Traffic Signal Control Methods // arXiv:1904.08117. 2020.
42. Haydari A., Yilmaz Y. Deep Reinforcement Learning for Intelligent Transportation Systems: A Survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2022. vol. 1. no. 23. pp. 11–32.
43. Fang S. et al. Trajectory Planning Method for Mixed Vehicles Considering Traffic Stability and Fuel Consumption at the Signalized Intersection // Journal of Advanced Transportation. 2020. pp. 1–10.
44. Guo Y., Ma J. DRL-TP3: A learning and control framework for signalized intersections with mixed connected automated traffic // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2021. vol. 132. pp. 103416.
45. Zhang L., Wang Y., Zhu H. Theory and Experiment of Cooperative Control at Multi-Intersections in Intelligent Connected Vehicle Environment: Review and Perspectives // Sustainability. 2022. vol. 3. no. 14. pp. 1542.
46. Agafonov A., Yumaganov A., Myasnikov V. Adaptive Traffic Signal Control Based on Maximum Weighted Traffic Flow // 2022 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). pp. 1–4.
47. Krauß S. Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics. – 1998.
48. RESCO. URL: <https://github.com/Pi-Star-Lab/RESCO> (дата обращения: 30.05.2022).

**Агафонов Антон Александрович** — д-р техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, кафедра геоинформатики и информационной безопасности, Самарский университет. Область научных интересов: геоинформационные технологии, анализ данных, управление и прогнозирование в интеллектуальных транспортных системах. Число научных публикаций — 50. [ant.agafonov@gmail.com](mailto:ant.agafonov@gmail.com); улица Лукачева, 39Б, 443086, Самара, Россия; р.т.: +7(846)267-4905.

**Юмаганов Александр Сергеевич** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория геоинформатики и информационной безопасности, Самарский университет. Область научных интересов: распознавание образов, анализ данных, интеллектуальные транспортные системы. Число научных публикаций — 37. [yumagan@gmail.com](mailto:yumagan@gmail.com); улица Лукачева, 39Б, 443086, Самара, Россия; р.т.: +7(846)267-4905.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00321, <https://rscf.ru/project/21-11-00321/>).



A. AGAFONOV, A. YUMAGANOV  
**COOPERATIVE CONTROL OF TRAFFIC SIGNALS AND  
VEHICLE TRAJECTORIES**

*Agafonov A., Yumaganov A. Cooperative Control of Traffic Signals and Vehicle Trajectories.*

**Abstract.** The transportation system is one of the most important parts of the country's economy. At the same time, the growth in road traffic has a significant negative impact on the economic performance of the industry. One of the ways to increase the efficiency of using the transportation infrastructure is to manage traffic flows, incl. by controlling traffic signals at signalized intersections. One of the trends in the development of intelligent transportation systems is the creation of vehicular ad hoc networks that allow the exchange of information between vehicles and infrastructure, as well as the development of autonomous vehicles. As a result, it becomes possible to formulate the problem of cooperative control of vehicle trajectories and traffic signals to increase the capacity of intersections and reduce fuel consumption and travel time. This paper presents a method for managing traffic flow at an intersection, which consists of the cooperative control of traffic signals and trajectories of connected/autonomous vehicles. The developed method combines an algorithm for the adaptive control of traffic signals based on a deterministic model for predicting the movement of vehicles and a two-stage algorithm for constructing the trajectory of vehicles. The objective optimization function used to construct the optimal trajectories takes into account fuel consumption, travel time on the road lane, and waiting time at the intersection. Experimental studies of the developed method were carried out in the microscopic traffic simulation package SUMO using three simulation scenarios, including two synthetic scenarios and a scenario in a real urban environment. The results of experimental studies confirm the effectiveness of the developed method in terms of fuel consumption, travel time, and waiting time in comparison with the adaptive traffic signal control algorithm.

**Keywords:** traffic trajectories, traffic signal control, cooperative control, deterministic model, intelligent transport system.

## References

1. Transport sector economic analysis. EU Science Hub. Available at: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/transport-sector-economic-analysis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/transport-sector-economic-analysis_en). (accessed: 30.05.2022).
2. O proizvodstve i ispol'zovanii valovogo vnutrennego produkta (VVP) v 2021 godu. Oficial'nyj sajt federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki. [Official website of the Federal State Statistics Service]. Available at: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/59\\_08-04-2022.htm](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/59_08-04-2022.htm). (accessed: 30.05.2022). (In Russ.).
3. Traffic congestion to cost the UK economy more than £300 billion over the next 16 years. Inrix. 2014. Available at: <https://inrix.com/press-releases/traffic-congestion-to-cost-the-uk-economy-more-than-300-billion-over-the-next-16-years/>. (accessed: 30.05.2022).
4. Requia W.J. et al. The health impacts of weekday traffic: A health risk assessment of PM 2.5 emissions during congested periods. *Environment international*. 2018. vol. 111. pp. 164–176.
5. Zhang K., Batterman S. Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *The Science of the total environment*. 2013. vol. 450–451. pp. 307–316.

6. Li X. et al. Stop-and-go traffic analysis: Theoretical properties, environmental impacts and oscillation mitigation. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2014. vol. 70. pp. 319–339.
7. Nalichie avtomobil'nogo transporta. Edinaja mezhdomestvennaja informacionno-statisticheskaja sistema (EMISS). [Unified Interdepartmental Information and Statistical System]. Available at: <https://fedstat.ru/indicator/36228>. (accessed: 30.05.2022). (In Russ.).
8. GOST R 56829-2015. [Intelligent transport systems. Terms and definitions. Electronic fund of legal and normative-technical documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200128315>. (accessed: 20.07.2022). (In Russ.).
9. Kak rabotajut Jandeks.Probki. [How Yandex.Traffic works. Yandex]. Available at: <https://yandex.ru/company/technologies/yaprobki/>. (accessed: 30.05.2022). (In Russ.).
10. Agafonov A.A., Myasnikov V.V. [Method for reliable shortest path determination in stochastic networks using parametrically defined stable probability distributions]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2019. vol. 18. № 3. pp. 558–582. (In Russ.).
11. Lopez P.A. et al. Microscopic Traffic Simulation using SUMO Maui, HI. *IEEE*, 2018. pp. 2575–2582.
12. Ma J. et al. Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part II: Computational issues and optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. vol. 95. pp. 421–441.
13. Hu J. et al. Integrated optimal eco-driving on rolling terrain for hybrid electric vehicle with vehicle-infrastructure communication. *Transportation research. Part C: Emerging technologies*. 2016. vol. 68. pp. 228–244.
14. Asadi B., Vahidi A. Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time. *IEEE transactions on control systems technology: a publication of the IEEE Control Systems Society*. 2011. vol. 19. no. 3. pp. 707–714.
15. Zhang H. et al. A priority-based autonomous intersection management (AIM) scheme for connected automated vehicles (CAVs). *Vehicles*. 2021. vol. 3. no. 3. pp. 533–544.
16. Jiang H. et al. Eco approaching at an isolated signalized intersection under partially connected and automated vehicles environment. *Transportation research. Part C: Emerging technologies*. 2017. vol. 79. pp. 290–307.
17. Lee J., Park B. Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment. *IEEE transactions on intelligent transportation systems: a publication of the IEEE Intelligent Transportation Systems Council*. 2012. vol. 13. no. 1. pp. 81–90.
18. Yu C. et al. Managing connected and automated vehicles at isolated intersections: From reservation to optimization-based methods. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. vol. 122. pp. 416–435.
19. Zhou F., Li X., Ma J. Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part I: Theoretical analysis with generalized time geography. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. vol. 95. pp. 394–420.
20. Yang Z. et al. Eco-trajectory planning with consideration of queue along congested corridor for hybrid electric vehicles. *Transportation research record*. 2019. vol. 2673. no. 9. pp. 277–286.
21. Barth M. et al. Dynamic ECO-driving for arterial corridors. *IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*. 2011. pp. 182–188.
22. Webster F.V. Traffic Signal Settings. *Road Research Technical Paper*. Stationery Office, 1958. no 39.

23. Little J., Kelson M., Gartner N. MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 1981. vol. 795. pp. 40–46.
24. Li M.-T., Gan A.C. Signal timing optimization for oversaturated networks using TRANSYT-7F. Transportation Research Record. 1999. no. 1683. pp. 118–126.
25. Papageorgiou M. et al. Review of road traffic control strategies. Proceedings of the IEEE. 2003. vol 12. no. 91. pp. 2043–2065.
26. El-Tantawy S., Abdulhai B. An agent-based learning towards decentralized and coordinated traffic signal control. 2010. pp. 665–670.
27. Varaiya P. The Max-Pressure Controller for Arbitrary Networks of Signalized Intersections Complex Networks and Dynamic Systems. Complex Networks and Dynamic Systems. New York: Springer New York, 2013. pp. 27–66.
28. Genders W., Razavi S. An Open-Source Framework for Adaptive Traffic Signal Control. arXiv:1909.00395. 2019.
29. Myasnikov V.V., Agafonov A.A., Yumaganov A.S. [A deterministic predictive traffic signal control model in intelligent transportation and geoinformation systems]. Komp'yuternaya optika – Computer optics. 2021. Issue 45. vol. 6. pp. 917–925. (In Russ.).
30. Abdulhai B., Pringle R., Karakoulas G. Reinforcement Learning for True Adaptive Traffic Signal Control. Journal of Transportation Engineering. 2003. vol. 129.
31. Wei H. et al. IntelliLight: A Reinforcement Learning Approach for Intelligent Traffic Light Control London United Kingdom. ACM. 2018. pp. 2496–2505.
32. Wang X. et al. Large-Scale Traffic Signal Control Using a Novel Multiagent Reinforcement Learning. IEEE Transactions on Cybernetics. 2021. vol. 1. no. 51. pp. 174–187.
33. Agafonov A., Myasnikov V. Traffic Signal Control: A Double Q-learning Approach 2021. pp. 365–369.
34. Schulman J. et al. Proximal Policy Optimization Algorithms. arXiv:1707.06347. 2017.
35. Ault J., Hanna J.P., Sharon G. Learning an Interpretable Traffic Signal Control Policy. arXiv:1912.11023. 2020.
36. Li Y., He J., Gao Y. Intelligent Traffic Signal Control with Deep Reinforcement Learning at Single Intersection. 2021. pp. 399–406.
37. Yang J., Zhang J., Wang H. Urban Traffic Control in Software Defined Internet of Things via a Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. vol. 6. no 22. pp. 3742–3754.
38. Yang S. et al. IHG-MA: Inductive heterogeneous graph multi-agent reinforcement learning for multi-intersection traffic signal control. Neural Networks. 2021. vol 139. pp. 265–277.
39. Haarnoja T. et al. Soft Actor-Critic Algorithms and Applications. arXiv:1812.05905. 2019.
40. Yau K.-L.A. et al. A survey on Reinforcement learning models and algorithms for traffic signal control. ACM Computing Surveys. 2017. vol. 3. 50 p.
41. Wei H. et al. A Survey on Traffic Signal Control Methods. arXiv:1904.08117. 2020. 32 p.
42. Haydari A., Yilmaz Y. Deep Reinforcement Learning for Intelligent Transportation Systems: A Survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2022. vol. 1. no. 23. pp. 11–32.
43. Fang S. et al. Trajectory Planning Method for Mixed Vehicles Considering Traffic Stability and Fuel Consumption at the Signalized Intersection. Journal of Advanced Transportation. 2020. pp. 1–10.

44. Guo Y., Ma J. DRL-TP3: A learning and control framework for signalized intersections with mixed connected automated traffic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. vol. 132. pp. 103416.
45. Zhang L., Wang Y., Zhu H. Theory and Experiment of Cooperative Control at Multi-Intersections in Intelligent Connected Vehicle Environment: Review and Perspectives. *Sustainability*. 2022. vol. 3. no. 14. pp. 1542.
46. Agafonov A., Yumaganov A., Myasnikov V. Adaptive Traffic Signal Control Based on Maximum Weighted Traffic Flow. *International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. 2022. pp. 1–4.
47. Krauß S. Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics. 1998.
48. RESCO. Available at: <https://github.com/Pi-Star-Lab/RESCO>. (accessed: 30.05.2022).

**Agafonov Anton** — Ph.D., Associate Professor, Senior researcher, Department of geoinformatics and information security, Samara National Research University. Research interests: geoinformation technologies, data analysis, control and forecasting in intelligent transportation systems. The number of publications — 50. [ant.agafonov@gmail.com](mailto:ant.agafonov@gmail.com); 39Б, Lukachev St., 443086, Samara, Russia; office phone: +7(846)267-4905.

**Yumaganov Alexander** — Ph.D., Senior researcher, Scientific research laboratory of geoinformatics and information security, Samara National Research University. Research interests: pattern recognition, data analysis, intelligent transportation systems. The number of publications — 37. [yumagan@gmail.com](mailto:yumagan@gmail.com); 39Б, Lukachev St., 443086, Samara, Russia; office phone: +7(846)267-4905.

**Acknowledgements.** The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-11-00321, <https://rscf.ru/en/project/21-11-00321/>.