

# Эффективность адаптивного управления дорожными сигналами в условиях смешанного потока транспортных средств

А.А. Агафонов  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
ant.agafonov@gmail.com

А.С. Юмаганов  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
yumagan@gmail.com

В.В. Мясников  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
vmyas@geosamara.ru

**Аннотация**—В работе рассматривается задача адаптивного управления сигналами светофоров в условиях смешанного транспортного потока, включающего как подключенные, так и управляемые водителями транспортные средства. Рассмотрен алгоритм управления, основанный на максимизации взвешенного потока транспортных средств, проходящих через перекресток. Проведены экспериментальные исследования эффективности управления в зависимости от доли подключенных транспортных средств в потоке.

**Ключевые слова**— подключенные транспортные средства, адаптивное управление, светофорное регулирование

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов повышения эффективности использования транспортной инфраструктуры, снижения уровня дорожных заторов и уменьшения временных затрат на совершение транспортных корреспонденций в целом является использование адаптивного управления сигналами светофоров на регулируемых перекрестках. Под адаптивным управлением сигналами светофоров понимается выбор следующей фазы в зависимости от наблюдаемой транспортной ситуации на перекрестке, а не использованием заранее предопределенного цикла переключения фаз.

Развитие беспроводных технологий в области интеллектуальных транспортных систем стало одним из факторов разработки подключенных (connected vehicles - CV) и автономных (AV) транспортных средств (ТС). Использование этих технологий открывает новые возможности для решения задачи адаптивного управления сигналами светофоров.

В [1] авторами был представлен обзор основных режимов управления сигналами светофоров, активного управления подключенными ТС и косвенного управления обычными ТС для изучения стратегии координированного управления несколькими перекрестками в условиях смешанного транспортного потока. Кроме того, были рассмотрены различные сценарии движения и проведено экспериментальное исследование информационного взаимодействия компонентов системы. В [2] авторы использовали данные от подключенных ТС для получения более подробной информации о состоянии транспортных потоков вблизи перекрестка. Однако экспериментальные исследования проводились только для одного перекрестка. В [3] был предложен алгоритм, который объединяет информацию о положениях подключенных ТС с данными, полученными от датчиков измерения

транспортного потока, для децентрализованного управления дорожными сигналами. Схожий подход был использован в [4], где был рассмотрен смешанный поток транспортных средств (включающий и подключенные, и управляемые водителями ТС). Экспериментальные исследования показали эффективность предложенного подхода для разной доли подключенных ТС в общем потоке.

В [5] авторы предложили схему пошаговой оптимизации цикла светофорного регулирования, используя информацию от подключенных ТС в качестве входных данных для обучения глубокой рекуррентной сети Q-обучения с подкреплением. Обучение с подкреплением для адаптивного управления сигналами светофоров на нескольких перекрестках также использовалось в [6]. Данные от подключенных ТС использовались для обучения алгоритма класса «Actor-Critic». В [7] была представлена система управления движением на перекрестке, которая включает в себя как оптимизацию светофорных циклов, так и управление траекториями движения подключенных ТС. В [8, 9] был разработан алгоритм адаптивного управления, использующий информацию от подключенных ТС для оценки времени прибытия на перекресток. Следующая фаза светофорного цикла выбиралась по критерию максимизации взвешенного потока транспортных средств, проходящих через перекресток. При этом считалось известной полная информация о состоянии транспортных средств в сети.

В данной работе проводится оценка эффективности алгоритма адаптивного управления сигналами светофоров в условиях смешанного транспортного потока, включающего как подключенные, так и управляемые водителями ТС.

## 2. МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В качестве алгоритма адаптивного управления дорожными сигналами, исследуемого в данной работе, используется алгоритм MaxPWFlow [8, 9]. Приведем краткое описание алгоритма.

Обозначим множество фаз выбранного светофорного объекта как  $P$ ,  $\tau_{min}$  – интервал переключения фаз,  $t_{cur}$  – длительность текущей (активной) фазы  $p_{cur} \in P$  светофора,  $p_{out} \in P$  – выбранная фаза для переключения. Тогда алгоритм MaxPWFlow в виде псевдокода может быть представлен следующим образом (Алгоритм 1).

**Алгоритм 1: MaxPWFlow**

**Входные данные:**  $\tau_{min}, t_{cur}, p_{cur}, P$

**Выходные данные:**  $p_{out}$   
**if**  $t_{cur} < \tau_{min}$  **then**  
      $p_{out} = p_{cur}$   
      $t_{cur} = t_{cur} + 1$   
**else**  
      $p_{out} = \operatorname{argmax}(\{PWFlow(p) \text{ for } p \text{ in } P\})$   
      $t_{cur} = 0$   
**end if**

Основной операцией алгоритма является расчет прогнозируемого потока функцией  $PWFlow(p)$  для каждой фазы  $p \in P$ :

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

где  $t(c)$  – оценка времени, необходимо транспортному средству  $c \in C_l^{obs}$  для достижения перекрестка,  $C_l^{obs}$  – множество «наблюдаемых» ТС,  $L_p^{income}$  – множество полос транспортной сети, движение по которым разрешено при включенной фазе  $p \in P$ ,  $\eta(c, l)$  – коэффициент, учитывающий время ожидания ТС.

В качестве «наблюдаемых» ТС в работе рассматриваются три типа ТС:

- Непосредственно подключенные ТС.
- Управляемые водителем ТС, движущиеся впереди/позади подключенных ТС на расстоянии не более, чем 250 м.
- Любые ТС, движущиеся на расстояние не более чем 20 м от регулируемого перекрестка.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Экспериментальные исследования алгоритма проводились в системе моделирования SUMO. В качестве сценария моделирования использовалась городская дорожная сеть, включающая 316 светофорных объектов [9]. В качестве критериев для оценки эффективности алгоритмы использовались среднее время движения и среднее время ожидания на перекрестке (в секундах). Моделирование проводилось на 10 эпизодах, отличающихся распределением транспортных средств сети. Каждый эпизод моделировался 10 раз с разным выбором подмножества ТС, считающихся подключенными в рамках сценария.

Графики зависимости среднего времени движения и среднего времени ожидания от доли подключенных ТС в потоке представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

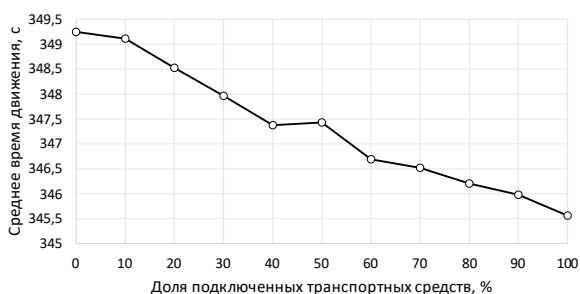


Рис. 1. Зависимость среднего времени движения от доли подключенных ТС

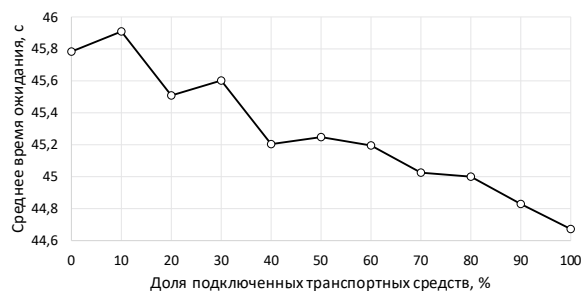


Рис. 2. Зависимость среднего времени ожидания от доли подключенных ТС

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была рассмотрена задача адаптивного управления дорожными сигналами при движении смешанного потока транспортных средств. Выделены три типа транспортных средств, данные от которых используются для оценки наблюдаемого транспортного потока. Проведена оценка эффективности алгоритма управления в зависимости от доли подключенных транспортных средств в потоке. Возможным направлением развития работы является разработка более сложных алгоритмов оценки характеристик смешанного потока по данным от подключенных транспортных средств.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

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

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zhang, L. Theory and Experiment of Cooperative Control at Multi-Intersections in Intelligent Connected Vehicle Environment: Review and Perspectives / L. Zhang, Y. Wang, H. Zhu // Sustainability (Switzerland). – 2022. – Vol. 14(3). – P. 1542. DOI: 10.3390/su14031542.
- [2] Feng, Y. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment / Y. Feng, K. L. Head, S. Khoshmoghham, M. Zamanipour // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2015. – Vol. 55. – P. 460-473. DOI: 10.1016/j.trc.2015.01.007.
- [3] Rafter, C.B. Augmenting Traffic Signal Control Systems for Urban Road Networks with Connected Vehicles / C.B. Rafter, B. Anvari, S. Box, T. Cherrett // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2020. – Vol. 21(4). – P. 1728-1740.
- [4] Islam, S.M.A.B.A. A real-time network-level traffic signal control methodology with partial connected vehicle information / S.M.A.B.A. Islam, A. Hajbabaie, H.M.A. Aziz // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2020. – Vol. 121. – P. 102830.
- [5] Zhang, Z. Traffic signal optimization for partially observable traffic system and low penetration rate of connected vehicles / Z. Zhang, M. Guo, D. Fu, L. Mo, S. Zhang // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2022. – Vol. 37. – P. 2070–2092. DOI: 10.1111/micc.12897.
- [6] Mo, Z. CVLight: Decentralized learning for adaptive traffic signal control with connected vehicles / Z. Mo, W. Li, Y. Fu, K. Ruan, X. Di // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2022. – Vol. 141. – P. 103728. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103728.
- [7] Guo, Y. DRL-TP3: A learning and control framework for signalized intersections with mixed connected automated traffic / Y. Guo, J. Ma // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2021. – Vol. 132. – P. 103416. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103416.
- [8] Мясников, В.В. Детерминированная прогнозная модель управления сигналами светофоров в интеллектуальных транспортных и геоинформационных системах / В.В. Мясников, А.А. Агафонов, А.С. Юмаганов // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 6. – С. 917-925. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1031.
- [9] Агафонов, А.А. Адаптивное управление дорожными сигналами на основе нейросетевого прогноза максимального взвешенного потока / А.А. Агафонов, А.С. Юмаганов, В.В. Мясников // Автометрия. – 2022. – Т. 58, № 5. – С. 85-97.