

УДК 656.13.08

А. Н. КЛИМОВИЧ, В. Н. ШУТЬ

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТКОМ НА ОСНОВЕ V2I ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

*Брестский государственный технический университет*

Задача эффективной организации дорожного движения с каждым годом становится все актуальнее. Постоянный рост числа автомобилей и объема перевозок требует совершенствования методов и алгоритмов управления движением. Такое совершенствование становится возможным за счет повсеместного распространения глобальных систем навигации и позиционирования, развития технологий связи и мобильного интернета, появления специализированных технологий взаимодействия между автомобилями и дорожной инфраструктурой (V2I), повышения качества моделей машинного обучения, компьютерного зрения, появления автономных автомобилей. В работе рассматривается подход к управлению движением на перекрестке, основанный на использовании V2I взаимодействия, приводится общая схема такого подхода и отличие от обычного светофорного регулирования. Описывается алгоритм организации движения, использующий преимущества V2I взаимодействия для повышения пропускной способности перекрестка, а также проводится анализ эффективности данного алгоритма по сравнению с классическим светофорным регулированием и более совершенными адаптивными системами управления. Повышение пропускной способности достигается за счет динамического формирования тактов перекрестка на основе более полной информации о транспортном потоке. Для сравнения различных методов регулирования используется авторская среда имитационного моделирования с применением мультиагентного подхода.

### Введение

Современные коммуникационные технологии, позволяющие осуществлять передачу данных между автомобилями – V2V (Vehicle-to-Vehicle), либо между автомобилями и дорожной инфраструктурой – V2I (Vehicle-to-Infrastructure), базируются на стандартах беспроводной связи DSRC (Dedicated short-range communications), WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) IEEE 802.11p [1]. Одно из очевидных применений этих технологий заключается в совершенствовании алгоритмов управления движением для повышения пропускной способности транспортных сетей. Общий принцип организации движения на перекрестке с использованием V2I-взаимодействия заключается в установке на перекрестке специального устройства-передатчика (RSU – road side unit), соединенного через проводную сеть с сервером или местным центром управления дорожным движением (рис. 1). Передатчик имеет определенный радиус действия, находясь в котором, автомобили имеют возможность осуществлять с ним обмен данными, сообщая свое положение, скорость и маршрут движе-

ния. На основе собранной информации, в соответствии с алгоритмом управления, система генерирует команды как для групп, так и для отдельных автомобилей, контролирующие порядок прохождения перекрестка, эффективное и безопасное использование его пропускной способности. Повышение эффективности управ-

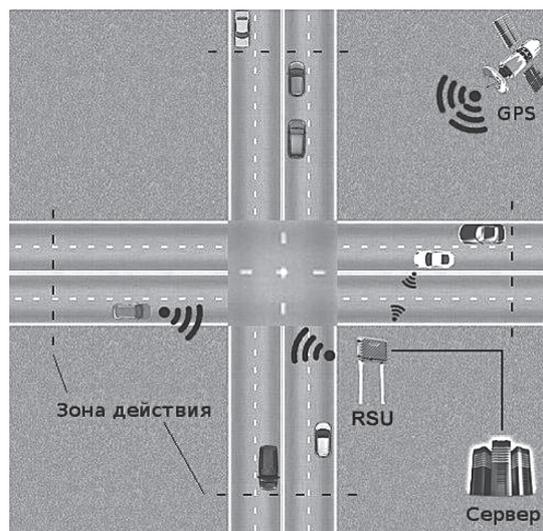


Рис. 1. Схема управления перекрестком с использованием V2I взаимодействия

ления достигается за счет принятия решений на основе более детальной информации о транспортных потоках и возможности более гибкого управления через передачу сообщений. Несмотря на имеющиеся варианты организации движения по описанной схеме [2, 3, 4], пока не существует какой-либо реализации, претендующей на повсеместное внедрение в качестве замены классическому светофорному регулированию.

### Предлагаемый алгоритм управления перекрестком

При классическом светофорном регулировании управление перекрестком осуществляется путем последовательной смены тактов управления. Каждый такт обладает определенной длительностью и задает разрешенные для движения направления. При этом такты меняются циклически, чтобы обеспечить возможность проезда в каждом направлении. Это приводит к растрате пропускной способности для направлений с низкой интенсивностью движения. Также статически заданные такты не всегда оптимально подходят для текущего состояния транспортных потоков.

Использование V2I-взаимодействия позволяет динамически формировать разрешенные для движения направления исходя из потребностей и загрузки транспортной сети. Для обеспечения безопасности проезда разрешать движение предлагается только автомобилям, движущимся по непересекающимся траекториям. Выбирать, в каких направлениях разрешать, а в каких запрещать движение, следует исходя из цели минимизировать задержки на перекрестке и повысить его пропускную способность. Однако напрямую оптимизировать эти показатели сложно в связи с большим количеством неопределенностей. Поэтому предлагается осуществлять выбор набора траекторий, разрешенных для движения, исходя из присвоенного им веса, который, в свою очередь, является суммой весов автомобилей, движущихся по этим траекториям. Весовую функцию следует выбирать таким образом, чтобы оптимизация, основанная на присвоенных весах, приводила в итоге к повышению эффективности перекрестка. Формально, пусть  $V = \{v_i\}$  – множество автомобилей, находящихся в радиусе действия передатчика, установленного на

перекрестке. Каждый автомобиль описывается набором параметров  $v_i = (d_i, t_i, m_i)$ , где  $d_i$  – расстояние до перекрестка,  $t_i$  – время ожидания, а  $m_i$  – маршрут движения, задающий дорогу и номер полосы до и после перекрестка. Для работы системы необходимо задать функцию  $f(v)$ , определяющую вес  $w$  отдельного автомобиля, а также матрицу конфликтных маршрутов  $C[m_i, m_j]$ , в которой элемент равен 1, если траектории автомобилей, движущихся по маршрутам, пересекаются, и 0 – иначе. Задача алгоритма управления перекрестком заключается в формировании последовательности тактов, где каждый такт описывается набором разрешенных направлений движения  $M$  и набором автомобилей  $A$ , которые должны проехать перекресток за время этого такта. Множество автомобилей выбирается так, чтобы максимизировать их суммарный вес, с учетом ограничения, что эти автомобили не должны двигаться по пересекающимся траекториям:

$$\sum_{v \in A} f(v) @ \max \quad (1)$$

$$\forall (i, j) m_i \ni M, m_j \ni M \Rightarrow C[m_i, m_j] = 0,$$

где

$$M = \{m_i : v_i \ni A\} \quad (2)$$

Для поиска автомобилей, входящих в множество  $A$ , выполняется их группировка. Обозначим через  $G_r^k(n)$  максимальное по размеру подмножество ближайших к перекрестку автомобилей, находящихся на полосе  $k$  дороги  $r$ , движущихся по  $n$  различным траекториям. Процесс формирования таких групп из автомобилей, относящихся к одной полосе описан в функции *CreateGroups* (Рис. 2).

Для каждой группы  $G_r^k(n)$  можно определить вес, как сумму весов принадлежащих ей автомобилей. Назовем две группы конфликтующими, если они относятся к одной полосе одной дороги, или если этим группам принадлежат автомобили, движущиеся по пересекающимся траекториям. Правило определения конфликтности групп описано в функции *AreConflictGroups* (рис. 3).

Построим граф, в котором вершинам соответствуют группы автомобилей  $G_r^k(n)$ , а ребро между вершинами существует тогда и только тогда, когда группы не конфликтуют. За построение такого графа отвечает функция *CreateGraph*

**Алгоритм 1.** Формирование групп  $G_r^k(n)$  из множества автомобилей  $V_r^k$ , движущихся по полосе  $k$  дороги  $r$ . Через  $V_r^k(n)$  обозначены ближайшие к перекрестку  $n$  автомобилей из  $V_r^k$ .

```

function CreateGroups( $V_r^k$ )
   $R := \{\}$ 
   $S := \{\}$ 
  for  $n \leftarrow |V_r^k|..1$  do
     $M := \{m_i: v_i \in V_r^k(n)\}$ 
    if  $|M| \notin S$  then
       $G_r^k(|M|) := V_r^k(n)$ 
       $R := R \cup \{G_r^k(|M|)\}$ 
       $S := S \cup \{|M|\}$ 
    end if
  end for
  return  $R$ 
end function

```

Рис. 2. Функция группировки автомобилей

**Алгоритм 2.** Функция определения конфликтности двух групп  $G_{r_1}^{k_1}(n_1)$  и  $G_{r_2}^{k_2}(n_2)$ .

```

function AreConflictGroups( $G_{r_1}^{k_1}(n_1), G_{r_2}^{k_2}(n_2)$ )
  if  $r_1 = r_2$  and  $k_1 = k_2$  then
    return True
  else if  $\exists (v_i, v_j): v_i \in G_{r_1}^{k_1}(n_1), v_j \in G_{r_2}^{k_2}(n_2), C[m_i, m_j] = 1$  then
    return True
  else
    return False
  endif
end function

```

Рис. 3. Функция определения конфликтности групп

(рис. 4). Заметим, что любой полный подграф, или клика, этого графа задает некоторое множество автомобилей, движущихся по непересекающимся траекториям. Тогда клика наибольшего веса и будет определять множество автомобилей  $A$  для текущего такта светофора. Поиск клики максимального веса является типовой задачей, для которой известны эффективные алгоритмы [5, 6]. Поэтому в дальнейшем при описании алгоритмов будем ссылаться на функцию *FindMaxWeightClique*, принимающую на вход описание графа и возвращающую множество вершин, принадлежащих клике максимального веса в этом графе.

После нахождения автомобилей, относящихся к первому такту, процесс продолжается

**Алгоритм 3.** Функция, выполняющая построение графа неконфликтующих групп  $G = (U, E, W)$ , где  $U$  – множество вершин, элементами которого являются группы автомобилей  $G_r^k(n)$ ,  $E$  – множество ребер графа, а  $W$  – веса вершин. На вход функция принимает множество всех автомобилей  $V$ .

```

function CreateGraph( $V$ )
   $U := \{\}$ 
  foreach  $V_r^k \in V$  do
     $U := U \cup CreateGroups(V_r^k)$ 
  end foreach
   $E := \{(g_i, g_j): g_i \in U, g_j \in U, AreConflictGroups(g_i, g_j) = False\}$ 
   $W := \{w_g = \sum_{v_i \ni g} f(v_i): g \in U\}$ 
   $G := (U, E, W)$ 
  return  $G$ 
end function

```

Рис. 4. Построение графа неконфликтующих групп

**Алгоритм 4.** Формирование набора описаний тактов  $P$  на основе множества всех автомобилей  $V$ . Описанием отдельного такта перекрестка является подмножество автомобилей  $A$ .

```

function CreatePhases( $V$ )
   $P := \{\}$ 
  while  $V \neq \emptyset$  do
     $G := CreateGraph(V)$ 
     $Q := FindMaxWeightClique(G)$ 
     $A := \{\}$ 
    foreach  $q \in Q$  do
      foreach  $v \in q$  do
         $A := A \cup \{v\}$ 
      end foreach
    end foreach
     $P := P \cup \{A\}$ 
     $V := V \setminus A$ 
  end while
  return  $P$ 
end function

```

Рис. 5. Функция формирования тактов перекрестка

для оставшихся автомобилей. В результате получается последовательность описаний тактов, и для каждого автомобиля определено, к какому такту он относится. Для этого используется функция *CreatePhases* (рис. 5).

При классическом светофорном регулировании перекрестком существует понятие промежуточного такта [7]. В отличие от основных

**Алгоритм 5.** Формирование промежуточного такта на основе предыдущего  $A_1$  и следующего  $A_2$  основных тактов. Описанием промежуточного такта считается множество разрешенных для движения направлений  $M$ .

**function** *CreateIntermediatePhase*( $A_1, A_2$ )

$M_1 := \{m_i: v_i \in A_1\}$

$M_2 := \{m_j: v_j \in A_2\}$

$M := \{m_i: m_i \in M_1, \forall m_j \in M_2 \Rightarrow C[m_i, m_j] = 0\} \cup \{m_j: m_j \in M_2, \forall m_i \in M_1 \Rightarrow C[m_i, m_j] = 0\}$

**return**  $M$

**end function**

Рис. 6. Функция формирования промежуточного такта

тактов, которые служат для разрешения движения определенным группам транспортных и пешеходных потоков и запрета движения другим группам, движущимся в конфликтующем направлении, промежуточные обеспечивают окончание проезда перекрестка теми транспортными средствами, которые не смогли своевременно остановиться у стоп-линии, и служат для подготовки перекрестка к передаче права на движение следующей группе потоков. Во время промежуточного такта во всех направлениях включается запрещающий сигнал светофора и новым транспортным средствам запрещается выезжать на перекресток. Обычно, промежуточный такт включается на короткий промежуток времени в несколько секунд. Так как основные такты в нашем алгоритме формируются динамически, может быть полезным и динамическое формирование промежуточных тактов на основе предыдущего и следующего основных тактов. Для этого из разрешенных для движения направлений выбирается неконфликтующее подмножество в соответствии с функцией *CreateIntermediatePhase* (рис. 6).

### Протокол обмена сообщениями

Алгоритм управления перекрестком основан на динамическом формировании описаний тактов исходя из текущего состояния транспортных потоков. Для получения информации о транспортных потоках контроллер перекрестка периодически, например каждый 10 с, иницирует запрос данных от автомобилей, находящихся в радиусе действия. Каждый автомо-

биль на такой запрос передает необходимые данные, такие как  $d$  – расстояние до перекрестка,  $t$  – время, проведенное автомобилем ожидая в очереди, и  $m$  – маршрут, определяющий дорогу и номер полосы до и после перекрестка. На основе собранных данных контроллер определяет наперед несколько тактов с помощью функции *CreatePhases* (рис. 5). Далее автомобилям *CreateIntermediatePhase* сообщается, в каких направлениях с каких полос разрешено движение согласно текущему такту. Проехав перекресток, автомобили сообщают контроллеру свой идентификатор, что позволяет экономить пропускную способность перекрестка. Как только все автомобили, относящиеся к текущему такту, проехали перекресток, на несколько секунд включается промежуточный такт, рассчитанный с помощью функции (рис. 6), а затем сразу следующий основной такт. При каждом переключении такта выполняется передача широковещательного сообщения с информацией о разрешенных для движения направлениях. Описанный процесс продолжается циклически.

### Моделирование

Для определения эффективности предлагаемого алгоритма и сравнения его с классическими методами светофорного регулирования перекрестком был проведен ряд экспериментов в авторской среде моделирования. Были созданы модели перекрестков двухполосных и трехполосных дорог (рис. 7). Для каждого перекрестка выполнялись запуски с различной

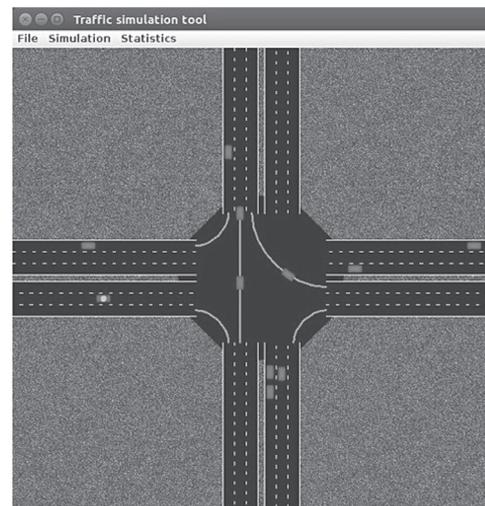


Рис. 7. Пример перекрестка трехполосных дорог в системе моделирования

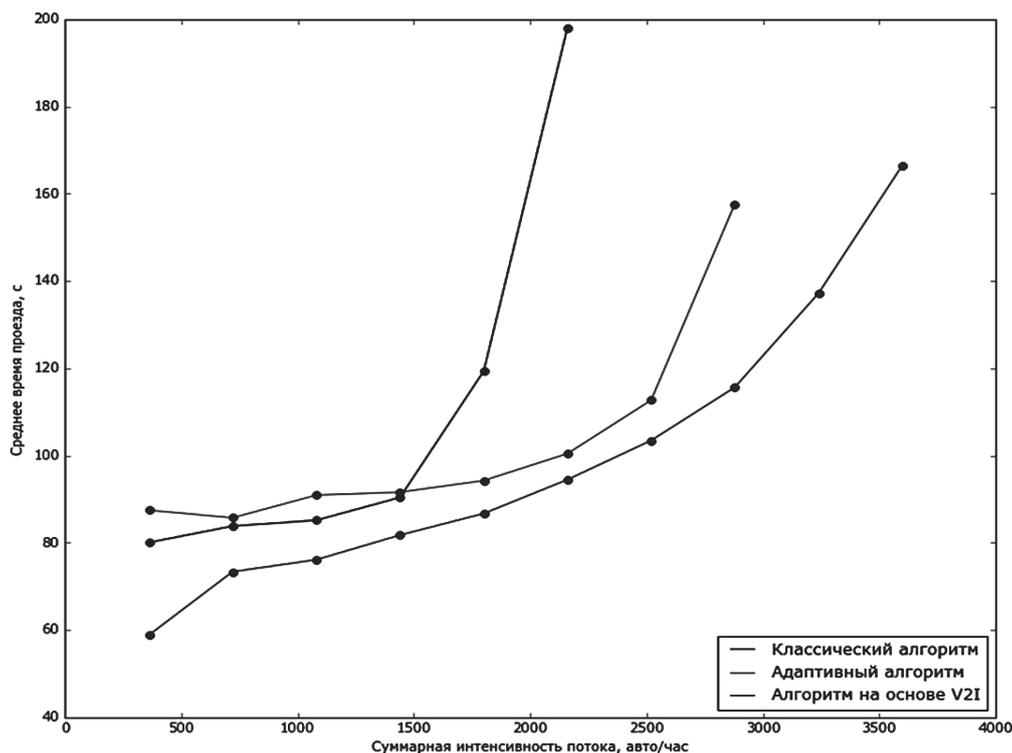


Рис. 8. Зависимость среднего времени проезда перекрестка от суммарной интенсивности транспортных потоков

интенсивностью транспортных потоков и различными формами нагрузки: равномерной, когда интенсивность одинакова с различных направлений, и неравномерной, когда с одного из направлений прибывает в два раза больше автомобилей, чем с остальных.

В качестве показателя эффективности алгоритма было выбрано среднее время проезда перекрестка, включая время нахождения на дорогах непосредственно до и после перекрестка. Для сравнения были выбраны два алгоритма управления движением: классическое светофорное регулирование с постоянной длительностью фазы и адаптивное регулирование, когда время фазы в каком-либо направлении движения пропорционально соответствующей интенсивности транспортного потока. Среднее время проезда вычислялось после проведения эксперимента в течение часа модельного времени.

Проведенные эксперименты показали более высокую эффективность алгоритма на основе V2I-взаимодействия по сравнению с остальными. Особенно это проявилось на маленьких (до 1000 авто/ч) и больших (более 2500–3000 авто/ч) интенсивностях. Это объясняется тем, что на малых интенсивностях разработанный алгоритм позволяет в большинстве случа-

ев обеспечивать безостановочный проезд. На больших интенсивностях, когда классический и адаптивный алгоритмы уже не могут обеспечить необходимую пропускную способность, и начинается постоянный рост очередей и задержки, алгоритм на основе V2I-взаимодействия продолжает справляться и задержка для него растет не так быстро. Результаты экспериментов для трехполосного перекрестка с неравномерной формой нагрузки представлены на рисунке (рис. 8).

### Заключение

В работе был представлен оригинальный алгоритм управления движением на перекрестке, в основе которого лежит использование беспроводной связи между автомобилями и дорожной инфраструктурой. Был описан процесс динамического формирования тактов исходя из сведений о транспортных потоках, прибывающих к перекрестку. Для проверки эффективности описанного алгоритма был проведен ряд экспериментов в авторской среде моделирования, в результате которых алгоритм показал хорошие результаты, обеспечив более высокую пропускную способность перекрестка, чем при фиксированном и адаптивном светофорном регулировании. Дальнейшая работа по

улучшению алгоритма заключается в формировании правил динамического распределения автомобилей по полосам в зависимости от состояния транспортных потоков, регулированию скорости автомобилей с целью обеспечения безостановочного проезда.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Hiertz, G. R.** The IEEE 802.11 Universe / G. R. Hiertz [et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2010. – Vol. 48, № 1. – P. 62–70.
2. **Dresner, K. A.** Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management / K. Dresner, P. Stone // Journal of Artificial Intelligence Research. – 2008. – Vol. 31. – P. 591–656.
3. **Fei, Y.** New vehicle sequencing algorithms with vehicular infrastructure integration for an isolated intersection / Y. Fei, M. Dridi, A. El-Moudni // Telecommunication Systems. – 2012. – Vol 50, № 4. – P. 325–337.
4. **Климович, А. Н.** Современные подходы и алгоритмы управления транспортными потоками / А. Н. Климович, А. С. Рышук, В. Н. Шуть // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – № 3. – С. 252–256.
5. **Cai, S.** Fast Solving Maximum Weight Clique Problem in Massive Graphs / S. Cai, J. Lin // Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence. – 2016. – P. 568–574.
6. **Kumlander, D. A.** new exact algorithm for the maximum-weight clique problem based on a heuristic vertex-coloring and a backtrack search / D. Kumlander // 5th International Conference on Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences. – 2004. – P. 202–208.
7. **Кременец, Ю. А.** Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.

Поступила  
19.05.2018

После доработки  
09.07.2018

Принята к печати  
30.11.2018

*Klimovich A. N. Shuts V. N.*

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТКОМ НА ОСНОВЕ V2I-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

*The importance of efficient traffic management problem grows every year. Constantly increasing number of vehicles and traffic volume requires improvement of methods and algorithms of traffic control. Such improvement becomes possible due to the spreading of global navigation and positioning systems, the development of wireless communication technologies and mobile internet, the advance in specialized technologies for interaction between vehicles and road infrastructure (V2I), the enhancement of machine learning models, computer vision algorithms, the emergence of driverless cars. This paper considers the novel approach to traffic management at intersection based on the use of V2I communication, describes general scheme of such approach and differences with conventional traffic light regulation. Developed algorithm of intersection management utilizes advantages of V2I communication to increase throughput of the intersection comparing to simple traffic light regulation and more advanced adaptive methods. The increase of throughput is achieved due to the dynamic construction of regulation phases which can be done because of more complete information about traffic flow. The comparison of various methods of regulation was performed in developed traffic simulation environment based on multi-agent approach.*



**Климович Андрей Николаевич** закончил с отличием Брестский государственный технический университет по специальности «Искусственный интеллект» (2014), получил степень магистратура по той же специальности (2017). Научные интересы: интеллектуальные транспортные системы, искусственный интеллект, машинное обучение.

**Klimovich Andrei** graduated with honors from Brest State Technical University with a speciality in «Artificial intelligence» (2014), received master degree with the same speciality (2017). Scientific interests: intelligent transport systems, artificial intelligence, machine learning.



**Шуть Василий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры Интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета. Автор более двухсот работ, двух монографий, 25 патентов на изобретения. Научные интересы: интеллектуальные транспортные системы, беспилотный транспорт (30 публикаций и один патент), теория графов (20 публикаций), оптимизационные задачи дискретной математики (30 публикаций).

**Shuts Vasiliy** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Intellectual Information Technologies of the Brest State Technical University. Author of more than two hundred works, two monographs, 25 patents for invention. Scientific interests: intelligent transport systems, unmanned transport (40 publications), adaptive control systems for transport flows (30 publications and one patent), graph theory (20 publications), optimization problems of discrete mathematics (30 publications).