

## Метод разработки систем для распределённого управления транспортными потоками на основе взаимосвязанных агентов

*Д.М. Елькин, В.В. Вяткин*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Постоянно растущее количество транспортных средств создаёт большую нагрузку на транспортную сеть городов. Один из путей решения этой проблемы – разработка методов для управления движением в условиях существующих ограничений. Первые разработки по адаптивному управлению транспортом стали появляться в середине восьмидесятых годов прошлого века. Они смогли положительно повлиять на транспортную ситуацию городов и регионов. Каждый из методов адаптивного управления прошёл достаточно долгий путь до непосредственного применения, претерпевая постоянные изменения и доработки. В результате, системы, построенные на базе этих методов, внедряются и функционируют до сих пор. С целью упрощения процессов разработки, эксплуатации, обслуживания и масштабируемости адаптивных систем управления транспортом, реализации принципов активного управления увеличения гибкости подобных систем при проектировании и применении, был разработан метод построения распределённых систем управления транспортными потоками, который позволяет проектировать систему из готовых блоков и производить внедрение по принципу plug and play.

**Ключевые слова:** управление дорожным движением, адаптивное управление, распределённая система управления, трафик, МЭК 61499, plug and play.

### Введение

Важной характеристикой систем управления движением является быстрая реакция на изменяющиеся условия движения и ликвидация последствий заторов [1], с применением нестандартных алгоритмов управления, которое обеспечивается гибкостью системы. Существующие решения по адаптивному управлению транспортными потоками [2-3] неэффективно справляются с последствиями [4] и не работают в условиях перенасыщения [5], так как эти ситуации возникают при нестандартном состоянии движения, которое не заложено в алгоритмы соответствующих систем, следовательно, принимать решение должен оператор-человек или регулировщик, для этого необходим центр координации движения на уровне иерархии выше, что влечет за собой медленную реакцию на изменение транспортной ситуации в условиях большого количества данных и высокую

---

стоимость для оборудования таких центров управления движением. Кроме того, используемое в существующих решениях средство для применения управляющих воздействий с динамически изменяющейся характеристикой – светофор, устарело, и водители могли бы получать больше информации и применять более эффективные решения по управлению транспортным средством. Также, проектирование и изменение средств дорожной инфраструктуры на данный момент является сложным и дорогостоящим процессом [6], который напрямую влияет на транспортную ситуацию городов и регионов, поскольку при изменении транспортных или геометрических параметров улично-дорожной сети необходимо производить перепроектирование. Стоит учитывать тот факт, что различные участки дорожной сети обладают различными параметрами и характеристиками и двух одинаковых найти невозможно, поэтому процесс внедрения или изменения условий движения является сложной задачей, требующей каждый раз нахождения уникального решения.

В то же время, новые исследуемые методы управления, реализуемые на базе передовых технологий концепции IoT [7], обработки больших данных [8], облачных технологий [9], стратегии V2X и др. [10], показывают достаточно эффективные результаты управления транспортом при проведении имитационного моделирования [11-12], но зачастую требуют специального оборудования не только в дорожной инфраструктуре, но и в самих транспортных средствах, для постоянно изменяющихся стратегий управления требуется переобучение систем на новых данных, или составление сложных баз правил, на основе которых принимается решение об управлении, также зачастую для функционирования передовых методов управления требуются значительные вычислительные ресурсы или использование больших массивов данных, что наделяет системы множеством

---

недостатков, связанных с поддержанием, настройкой, обслуживанием и применением.

На основе проведённых исследований [13-15], можно сделать вывод, что применение распределённых систем является особенно эффективным подходом для управления дорожным движением, так как системы с централизованной архитектурой испытывают не только большие нагрузки на каналы связи, но и географически отделены от точки принятия решения по управлению, что может увеличить количество неисправностей или снизить качество работы системы.

### **Предпосылки создания метода**

Распределённые системы управления эффективны для управления транспортными потоками, так как не отделены от точки применения управляющих воздействий, что сокращает количество ошибок в работе системы и позволяет снизить вычислительную нагрузку. Очевидным вариантом является использование в качестве субъекта управления для некоторого участка дорожной сети - агента, чаще всего это перекрёсток и прилегающая к нему территория, при этом он должен быть связан с другими агентами на соседних перекрёстках и координироваться центром управления движением для поддержания общей стратегии управления. Такой вариант был исключён ввиду потери гибкости системы, эффективности работы при перегрузках и большого количества ресурсов при проектировании и развертывании.

В качестве примера, рассмотрим участок дорожной сети с одним перекрестком  $J_1$ , в рамках которого существуют направления движения транспортных потоков, которые пересекаются друг с другом в определённых точках на перекрестке, называемых конфликтными. Число конфликтных точек определяется разрешенными направлениями движения и количеством рядов движения транспортных средств.

---

На перекрестке существует 10 входящих полос для движения  $L_1 \dots L_{10}$ .

Каждая полоса для движения содержит 1 или более направлений движения транспортного потока (до 2-х)  $N_1, N_2$ .

Пересекающие направления образуют множества пересекающихся направлений для движения транспорта.

Например:  $Z_2 = \{A_1, A_3, A_4, A_5, A_8, A_9, A_{10}\}$

Только один из элементов множества (агентов) может въехать на перекрёсток безопасно, поэтому для начала движения необходимо получить «разрешение» на движение от элементов входящих в множество пересекающихся направлений – соседних агентов.

### Структура метода

Общая схема работы метода для участка дорожной сети представлена на рисунке 1, количество агентов, которые принимают участие в управлении, зависит от конфигурации транспортного пересечения и территории, прилегающей к нему. В качестве входной информации используется транспортная и геометрическая характеристика объекта управления (перекрёстка) или схема организации дорожного движения для участка дорожной сети (КСОДД).

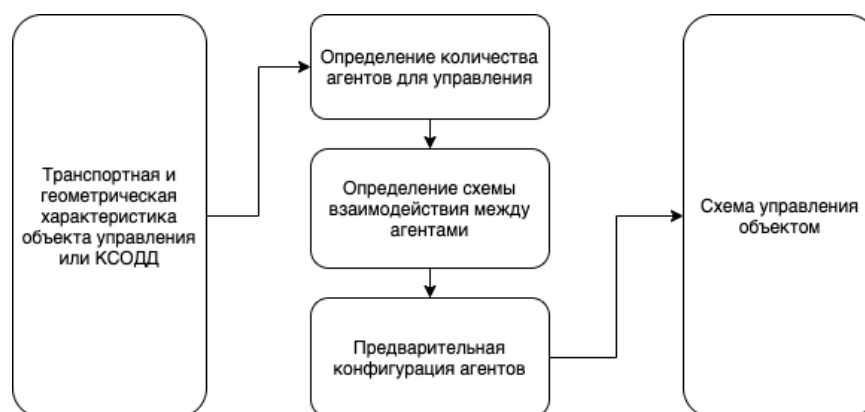


Рис. 1. – Схема работы метода

В первую очередь необходимо определить количество агентов, принимающих решение по управлению на исследуемом участке улично-

дорожной сети, затем создать схему взаимодействия этих агентов в зависимости от их физического расположения на объекте управления. Далее необходимо определить тип агента в зависимости от вида дорожной инфраструктуры, которую он представляет и провести предварительную конфигурацию.

Схема организации дорожного движения содержит данные о количестве полос для движения транспорта, дорожных знаках и светофорных объектах, расположенных на исследуемом участке дорожной сети.

В качестве агента для управления транспортом предложено использовать элементы дорожной инфраструктуры, которые обладают признаками автономности и имеют возможность применять управляющие воздействия к транспортному потоку, а именно: полосу для движения со светофором и дорожный знак. Количество агентов будет определяться суммой полос для движения в рамках перекрёстка и дорожных знаков на прилегающей к перекрёстку территории за вычетом полос для выезда с пересечения:

$$|line + sign - line\_out| \quad (1)$$

Для построения схемы взаимодействия агентов необходимо присвоить каждому агенту уникальный идентификационный номер.

### **Схема взаимодействия между агентами**

Условно агенты могут быть разделены на следующие категории, в зависимости от физического расположения на дорожной сети:

- агенты перекрёстка;
- агенты участка дорожной сети.

Агенты перекрёстка физически располагаются в границах транспортного пересечения и осуществляют управляющие воздействия на транспорт, который движется через это пересечение.

---

Агенты участка дорожной сети располагаются на дорогах вне транспортных пересечений и осуществляют управляющие воздействия на транспортный поток, движущийся вне перекрёстков.

Рассмотрим перекрёсток на дороге, он представляет совокупность пересекающихся направлений движения транспорта  $R = \{R_1...R_n\}$ , которые образуются в конфликтные точки  $dP = \{dP_1...dP_n\}$ , затрудняющие проезд и представляющие основные задержки в движении.

Каждую из конфликтных точек можно рассматривать как общий ресурс, к которому в один промежуток времени –  $t$ , может получить доступ только один из агентов – множества  $A = \{A_1...A_n\}$ .

Тогда транспортное пересечение можно представить в виде множества общих ресурсов  $C_i = dP \subset R$ , к которому должны получить доступ один из множества агентов -  $A$  в определённый промежуток времени –  $t$ .

Исходя из этого утверждения, можно сформулировать правила взаимодействия между агентами перекрёстка. Агент  $A_1$  должен осуществлять обмен информацией с агентом  $A_n$ , если между ними существуют следующие зависимости:

- Если один из элементов множества  $R \in A_i$ , множество конечных точек направлений движения агента  $A_1$  пересекается с множеством конечных точек направлений движения агента  $A_n$ .

Схема представлена на рисунке 2.

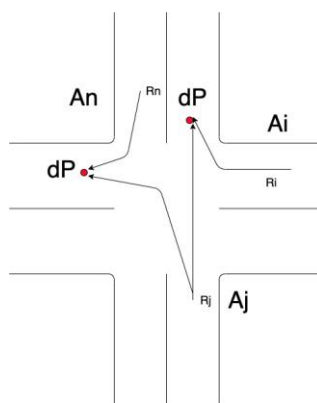


Рис. 2. – Пересечение направлений в конечных точках движения

- Направления движения агента  $A_1$  пересекаются с направлениями движения агента  $A_n$ . То есть, если один из элементов множества  $R \in A_i$  пересекается с  $R \in A_j$ . Схема представлена на рисунке 3.

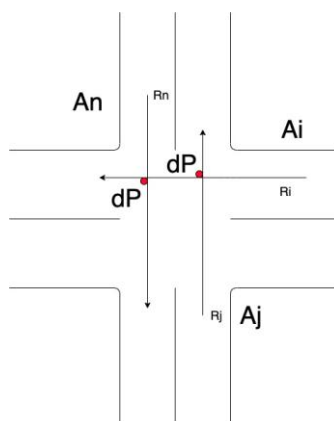


Рис. 3. – Прямое пересечение направлений

- Агент  $A_i$  располагается на одной траектории движения транспорта с агентом  $A_j$ . Схема представлена на рисунке 4.

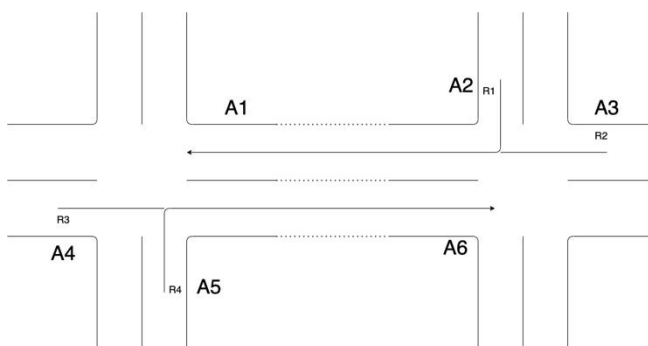


Рис. 4. – Общая траектория движения

Далее, опишем схему взаимодействия агентов участка дорожной сети. Агенты участка дорожной сети формируют и применяют управляющие воздействия на транспортный поток направления движения,  $R_n$  которого проходит через зону действия этого агента. Пусть все агенты  $A$ , располагающиеся в рамках одного направления движения транспорта, принадлежат множеству  $Z$ . Тогда, обмен информацией между агентами  $A_i$  и  $A_j$ , должен осуществляться, если  $A_i \in Z$  и  $A_j \in Z$ . Схема представлена на рисунке 5.

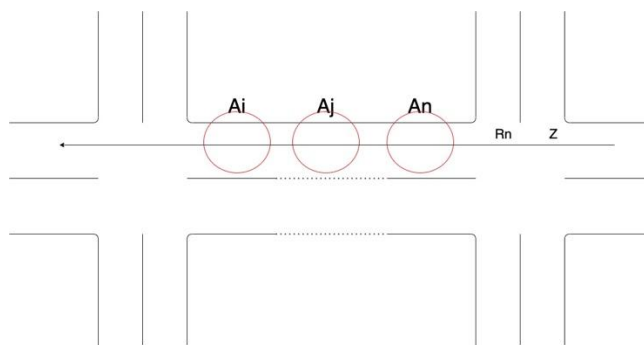


Рис. 5. – Агенты участка дорожной сети

Рассмотрим пример схемы взаимодействия агентов в рамках одного перекрёстка без привязки к направлениям движения транспортных потоков. Схема представлена на рисунке 6.

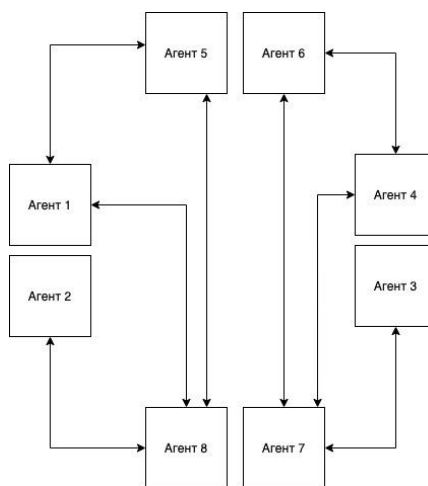


Рис. 6. – Схема взаимодействия для перекрёстка

Агент 1 должен осуществлять обмен информацией с Агентом 8, так как траектории движения транспортных средств, которые движутся по полосам, контролируемым агентами, пересекаются. Это же правило актуально для пар Агентов 2 и 8, 7 и 4, 6 и 7, 1 и 5.

В свою очередь, конечные точки движения транспорта, который находится под контролем Агентов 7 и 4, 5 и 8 совпадают, поэтому эти агенты взаимодействуют друг с другом для контроля проезда транспортного пересечения.

Для нескольких взаимосвязанных перекрестков схема взаимодействия агентов представлена на рисунке 7.



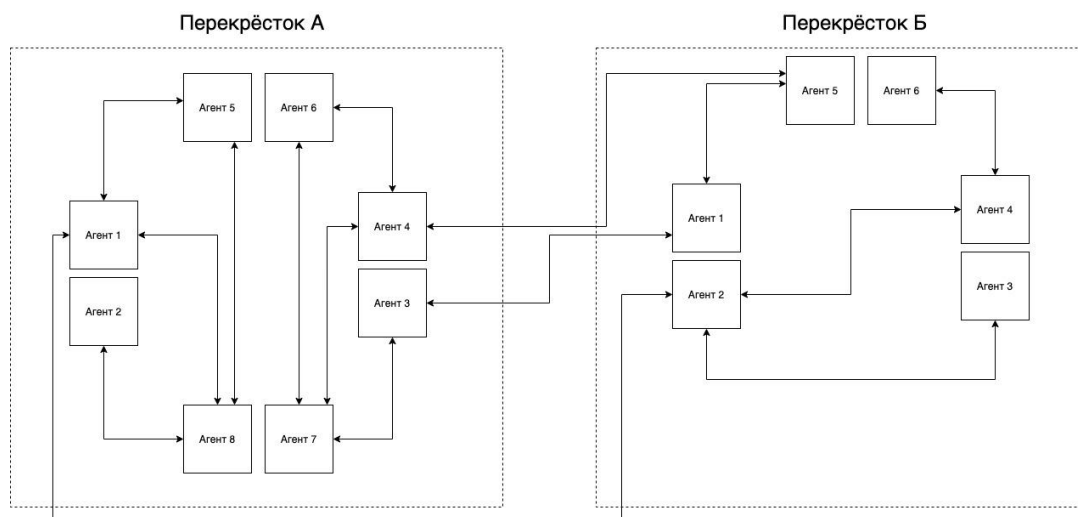


Рис. 7. – Схема взаимодействия для группы перекрёстков

Агент 5 пересечения Б и Агент 4 пересечения А находятся на одной траектории движения транспортного потока и должны осуществлять обмен информацией друг с другом для организации эффективного управления движением. Это правило также актуально для агентов 3 и 1 пересечения А и агентов 1 и 2 пересечения Б.

На участке улично-дорожной сети работают не только агенты на перекрестках, но и агенты, располагающиеся между транспортными пересечениями, которые могут быть выполнены в виде знаков переменной информации. Схема взаимодействия агентов для участка улично-дорожной сети представлена на рисунке 8.

В таком случае, Агент 6 транспортного пересечения Г связан с Агентом 1 УДС и с Агентом 3 пересечения А, так как все эти агенты располагаются на одной траектории движения транспортного потока и на основе обмена информацией друг с другом и другими связанными агентами формируют управляющие воздействия на транспортный поток. Для рассматриваемой схемы участка дорожной сети правило также актуально для Агента 6 перекрестка В, Агента 2 УДС и Агента 3 пересечения Б.

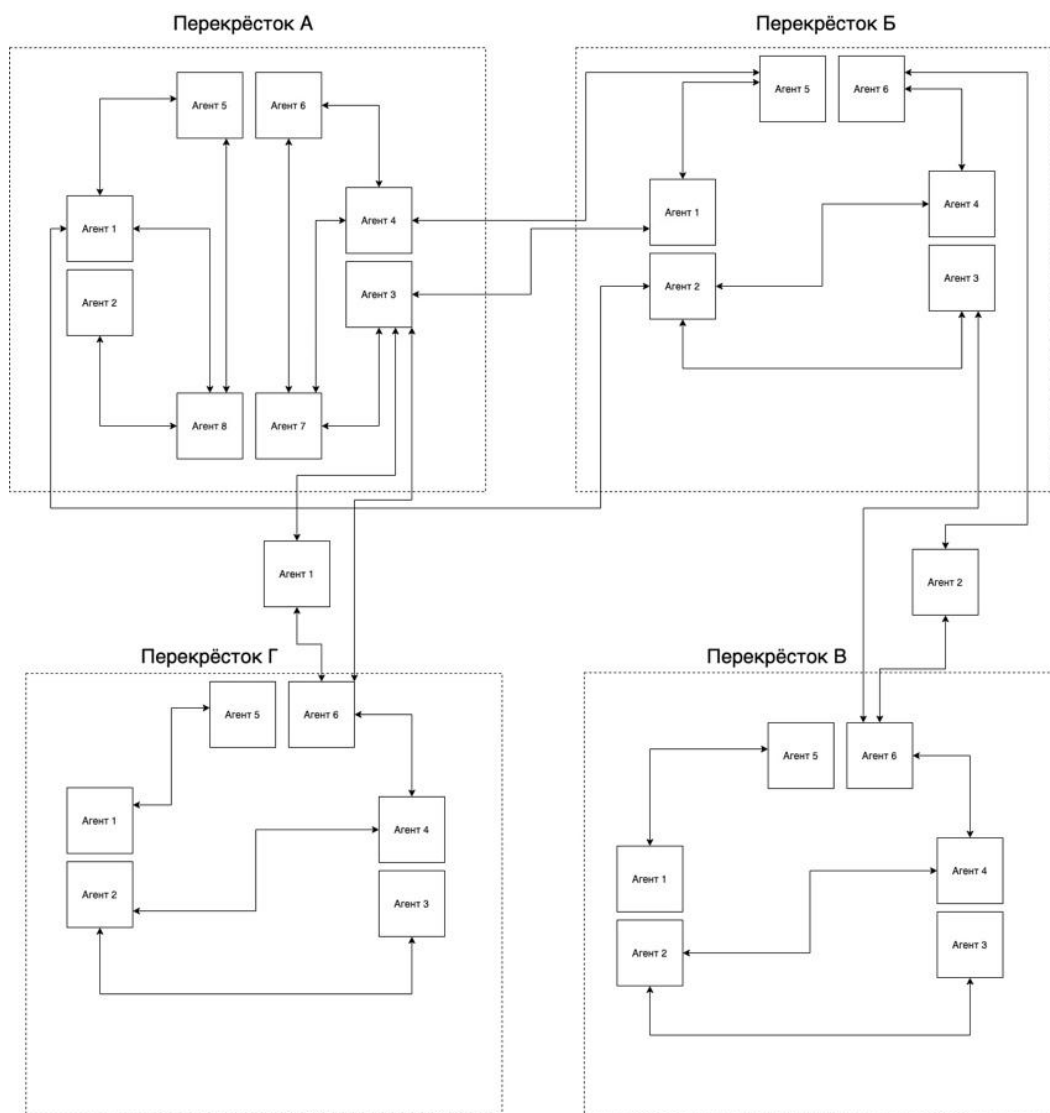


Рис. 8. – Схема взаимодействия для участка УДС

### Конфигурация интеллектуального агента

В зависимости от типа агента и его физического расположения на дорожной сети, агент реализовывает различный функционал и соответственно по-разному сконфигурирован (наполнен различными модулями).

Общая структура агента для управления транспортными потоками представлена на рисунке 9.

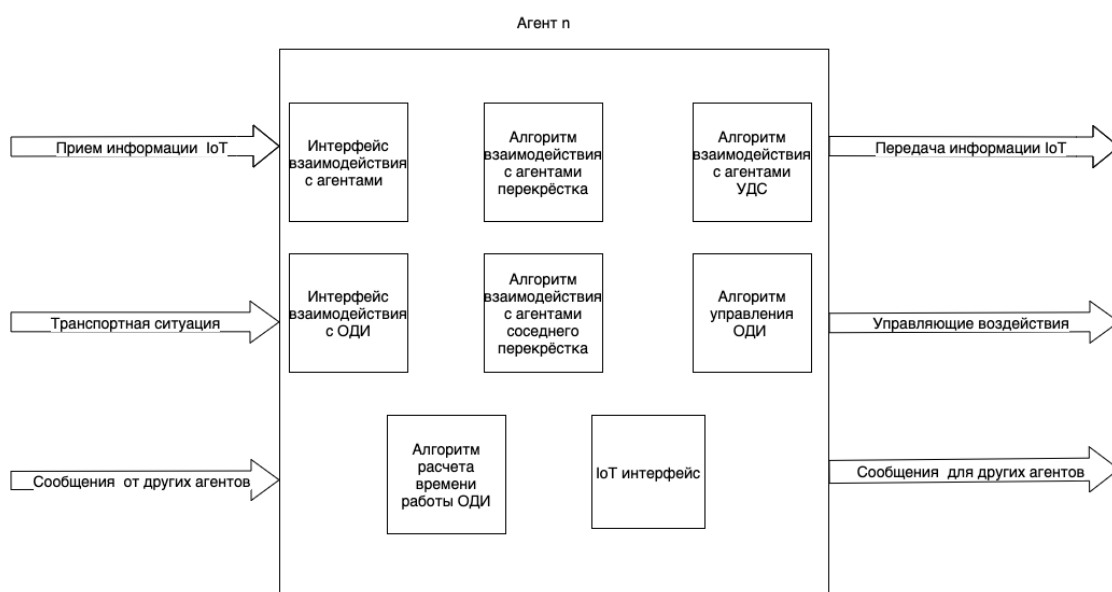


Рис. 9. – Структура агента

Интерфейс взаимодействия с агентами – это физический интерфейс, который позволяет агенту связываться с другими агентами, может быть выполнен в виде открытых или закрытых стандартов и протоколов связи.

Интерфейс взаимодействия с объектами дорожной инфраструктуры – физический интерфейс для получения данных или вывода информации для применения управляющих воздействий на подконтрольный объект дорожной инфраструктуры.

IoT интерфейс – физический интерфейс для обмена данными о транспортной ситуации с центром интернета вещей/центром управления дорожным движением.

Алгоритмы - для реализации различных потребностей агента во взаимодействии и формировании управляющих воздействий на транспортный поток.

В зависимости от типа агента, его физического расположения и наличия соседних агентов, конфигурация агента изменяется при первоначальной или последующей настройке.

Для агентов, которые располагаются непосредственно в пределах транспортного пересечения – агентов перекрёстка, возможно несколько вариантов исполнения:

- для локально управляемого перекрестка без связи с другими транспортными пересечениями;
- для перекрёстка в сети, который связан с другими перекрёстками;
- для транспортного пересечения с располагающимися рядом агентами УДС;
- для перекрестка в сети с располагающимися агентами УДС.

В то же время для агентов УДС, располагающихся вне транспортных пересечений, возможны следующие варианты исполнения:

- для локального агента УДС;
- для агента УДС, связанного с транспортными пересечениями;
- для агента УДС связанного с соседними агентами УДС;
- для агента УДС, связанного с транспортными пересечениями и соседними агентами УДС.

Алгоритм, предлагаемый для взаимодействия между агентами для управления движением на перекрёстке, является модификацией алгоритма взаимного исключения Рикарта-Агравалы, который в свою очередь является модификацией алгоритма Лампорта.

Так как перекрёсток был принят за множество общих ресурсов  $S = \{dP_1 \dots dP_n\}$  к каждому из которых может получить доступ только один агент  $A$  в промежуток времени  $t$ .

Когда количество автомобилей на участке, подконтрольном Агенту  $A_i$ , превышает установленное,  $A_i$  запрашивает доступ к общему ресурсу  $dP_i$  у Агентов  $A \in dP_i$ , рассылая им запрос - req с временной меткой отправки запроса, количеством ожидающих транспортных средств -  $nV$  и общее время ожидания доступа к общему ресурсу -  $Td$ .

---

$T_d$  рассчитывается суммированием  $T_i$  – индивидуальным временем ожидания ТС, от момента прибытия первого ТС на подконтрольный агенту участок дорожной сети в пределах перекрёстка до последнего прибывшего ТС к моменту отправки запроса на доступ к общему ресурсу или до достижения количества ТС, которые составят критическую перегрузку направления -  $V_{max}$  (рассчитывается, исходя из максимальной длительности фазы или на основе сравнения всех фаз).

$$T_d = \sum_{i=1}^{n=V_{max}} T_i \quad (2)$$

Когда агент  $A_j$  получает от агента  $A_i$  запрос на доступ к общему ресурсу (проезд перекрёстка):

- если  $A_j$  сам не отправлял запрос, то посылает ответ - ans;
- если  $A_j$  отправлял запрос, то сравнивается количество  $nV$  и время ожидания  $T_d$  (может заблокироваться в пробке - решается отслеживанием убывших ТС), приоритет отдаётся Агенту с большим  $T_d$ , при равенстве  $T_d$ , приоритет отдаётся большему  $nV$ , при равенстве  $nV$ , сравниваются временные метки отправки запроса и приоритет отдаётся более ранней, при равенстве временных меток, приоритет отдаётся агенту с большим порядковым номером. В конечном итоге Агенту, получившему приоритет, отправляется ответ – ans, означающий одобрение на допуск к общему ресурсу (проезд перекрёстка).
- в остальных случаях  $A_j$  задерживает отправку ответа – ans.

Агент  $A_i$  может разрешить ТС въезд на перекрёсток, только когда получены ответы – ans от всех агентов  $A \in dP_i$ .

После того, как ответы от всех необходимых агентов получены,  $A_i$  рассчитывает время  $t$ , исходя из количества ТС на подконтрольном участке дорожной сети.

Когда промежуток времени  $t$  подходит к концу,  $A_i$  должен разблокировать доступ к общему ресурсу и обнулить время ожидания  $T_d$ .

Агент  $A_i$  должен разослать задержанные ответы - ans всем агентам  $A \in dP_i$ :

- После того, как Агент разблокировал общий ресурс;
- Если количество транспортных средств, ожидающих проезда, уменьшилось до нуля.

### **Пример применения метода**

Рассмотрим участок улично-дорожной сети, состоящий из четырёх перекрестков, соединенных одной из частей с соседним транспортным пересечением.

Перекрёсток J1 – Т-образный перекрёсток, содержащий по две полосы для движения на каждом из направлений.

Перекрёсток J2 – является крестообразным, так же, как и перекрёсток J1 содержит по две полосы для движения в каждом из направлений.

Перекрёсток J3 – крестообразный, в западном и южном направлениях содержит по три полосы для движения транспорта, а в северном и восточном по две полосы для движения в каждом из направлений.

Перекрёсток J4 – крестообразный в западном и северном направлениях содержит по две полосы для движения транспорта, а в южном и восточном по одной полосе для движения транспорта в каждом из направлений.

Между перекрёстками J1 и J2, а также J3 и J4 располагаются 4 дорожных знака по одному для каждого из направлений движения. Схема рассматриваемого участка улично-дорожной сети изображена на рисунке 10.

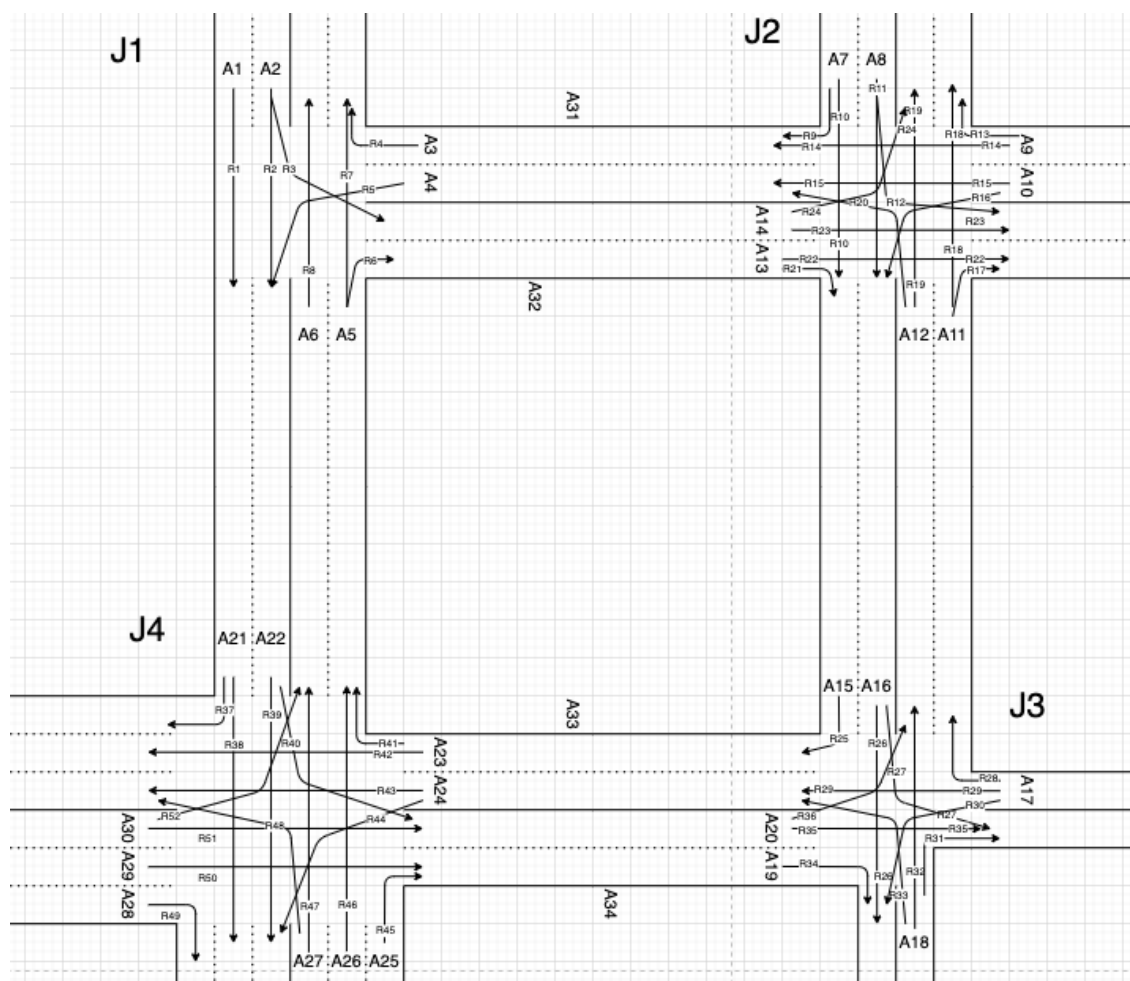


Рис. 10. – Схема участка УДС

Пример работы метода для перекрестка J1 выглядит следующим образом:

Определим необходимость взаимодействия агентов, согласно правилу множества пересекающихся конечных точек вектора движения агентов перекрёстка.

Агент A1 по направлению движения R1 не содержит пересечения в конечных точках с направлениями движения, контролируемые другими агентами.

Агент A2 в конечной точке направления движения R2 пересекается с агентом A4 по направлению движения R5 и поэтому перед разрешением движения транспорту они должны осуществлять обмен информацией.

Агент А3 в конечной точке вектора движения R4 транспорта пересекается с конечной точкой движения R7 транспорта агента А5, следовательно они должны взаимодействовать друг с другом.

Агент А4 в конечной точке вектора движения R5 транспорта пересекается с конечной точкой движения R2 транспорта агента А2, следовательно они должны взаимодействовать друг с другом.

Агент А5 по направлению движения R6 не содержит пересечений с другими агентами.

Агент А6 по направлению движения R8 не содержит пересечения в конечных точках с направлениями движения, контролируемые другими агентами.

Далее, определим необходимость взаимодействия агентов по правилу пересекающихся векторов движения транспорта.

Агент А1 по направлению движения не содержит пересечения в направлениях движения контролируемые другими агентами.

Агент А2 пересекается по вектору направления движения R3 с агентами А4, А5, А6 по направлениям движения R5, R7, R8.

Агент А3 по вектору направления движения не пересекается с другими агентами перекрёстка.

Агент А4 по вектору направления движения R5 пересекается с агентами А5, А6 по направлениям R2, R7, R8.

Таким образом, в рамках перекрёстка J1 мы получим следующие наборы связанных агентов (Set):

Для направления R1:

$\{A1\} \in S1J1;$

Для направления R2:

$\{A2, A4\} \in S2 J1;$

Для направления R3:



$\{A2, A4, A5, A6\} \in S3 J1;$

Для направления R4:

$\{A3, A5\} \in S4 J1;$

Для направления R5:

$\{A2, A4, A5, A6\} \in S5 J1;$

Для направления R6:

$\{A5\} \in S6 J1;$

Для направления R7:

$\{A2, A3, A4, A5\} \in S7 J1;$

Для направления R8:

$\{A2, A4\} \in S8 J1.$

### **Заключение**

В работе был предложен метод разработки распределённых систем для управления транспортными потоками, описана схема его работы, выделены основные правила взаимодействия агентов, предложена структура интеллектуальных агентов в зависимости от их расположения на участке улично-дорожной сети. Описан алгоритм для взаимодействия агентов в рамках транспортного пересечения.

Описан пример работы метода применительно к абстрактному участку улично-дорожной сети, состоящему из 4-х транспортных пересечений. Получены схемы взаимодействия агентов для организации управления на исследуемом участке, для агентов на перекрёстке, для агентов на сети перекрёстков и для агентов УДС.

Предлагаемый в работе метод основан на активном взаимодействии агентов (минимальных единиц дорожной инфраструктуры) – субъектов управления, для реализации общей стратегии управления и применения управляющих воздействий к объектам управления. Взаимодействие и применение управляющих воздействий основано на алгоритмах,

---

предложенных автором, но структура метода позволяет применять и другие алгоритмы, которые могут быть разработаны научным сообществом.

В ходе дальнейшей работы планируется реализация агентов перекрёстка, агента улично-дорожной сети и составляющих их модулей, алгоритмов управления и коммуникации в виде функциональных блоков. Блоки будут разработаны в рамках стандарта событийно связанных автоматных моделей МЭК 61499, что позволит проектировать и масштабировать систему для управления транспортными потоками с высокой скоростью в зависимости от изменяющейся транспортной или геометрической характеристики объекта управления.

### Литература

1. Зырянов В.В., Семчугова Е.Ю. Применение информационных технологий при повышении мобильности и обеспечении транспортной безопасности // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1083](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1083)
2. Ozbay, Kaan, et al. Evaluation of adaptive control strategies for NJ highways. No. FHWA-NJ-2006-001. 2006.
3. Pavleski Daniel, Koltovska-Nechoska Daniela and Ivanjko Edouard Evaluation of adaptive traffic control system UTOPIA using microscopic simulation. 2017 International Symposium ELMAR. IEEE, 2017.
4. Leontiadis, Ilias, et al. "On the effectiveness of an opportunistic traffic management system for vehicular networks." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 12.4 (2011): 1537-1548.
5. An, Sheng-hai, Byung-Hyug Lee, and Dong-Ryeol Shin. "A survey of intelligent transportation systems." 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. IEEE, 2011.

6. Fries RN, Gahrooei MR, Chowdhury M, et al. Meeting privacy challenges while advancing intelligent transportation systems. *Transport Res C: Emer* 2012; 25: 34–45.
  7. Misbahuddin, Syed, et al. "IoT based dynamic road traffic management for smart cities." 2015 12th International Conference on High-capacity Optical Networks and Enabling/Emerging Technologies (HONET). IEEE, 2015.
  8. Rizwan, Patan, K. Suresh, and M. Rajasekhara Babu. "Real-time smart traffic management system for smart cities by using Internet of Things and big data." 2016 international conference on emerging technological trends (ICETT). IEEE, 2016.
  9. He, Wu, Gongjun Yan, and Li Da Xu. "Developing vehicular data cloud services in the IoT environment." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10.2 (2014): 1587-1595.
  10. Rakha H and Kamalanathsharma R. Eco-driving at signalized intersections using v2i communication. In: 2011 14th international IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC), Washington, DC, 5-7 October 2011, pp.341-346. New York: IEEE.
  11. Samadi S. et al. Performance evaluation of intelligent adaptive traffic control systems: A case study // *Journal of transportation technologies*. – 2012. – Т. 2. – №. 03. – С. 248.
  12. Зырянов В.В., Моделирование при транспортном обслуживании мега-событий // *Инженерный вестник Дона*, 2011, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/709](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/709)
  13. Liu, Ying, Lei Liu, and Wei-Peng Chen. "Intelligent traffic light control using distributed multi-agent Q learning." 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2017
-

14. Bui, Khac-Hoai Nam, and Jason J. Jung. "Internet of agents framework for connected vehicles: A case study on distributed traffic control system." *Journal of Parallel and Distributed Computing* 116 (2018): 89-95.

15. De Souza AM and Villas L. A fully distributed traffic management system to improve the overall traffic efficiency. In: 2016 ACM international conference on modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, Malta, 13-17 November 2016. New York: ACM.

### References

1. Zyryanov V.V., Semchugova E.Yu., *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2012, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1083](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1083)

2. Ozbay, Kaan, et al. Evaluation of adaptive control strategies for NJ highways. No. FHWA-NJ-2006-001. 2006.

3. Pavleski Daniel, Koltovska-Nechoska Daniela and Ivanjko Edouard Evaluation of adaptive traffic control system UTOPIA using microscopic simulation. 2017 International Symposium ELMAR. IEEE, 2017.

4. Leontiadis, Ilias, et al. "On the effectiveness of an opportunistic traffic management system for vehicular networks." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12.4 (2011): 1537-1548.

5. An, Sheng-hai, Byung-Hyug Lee, and Dong-Ryeol Shin. "A survey of intelligent transportation systems." 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. IEEE, 2011.

6. Fries RN, Gahrooei MR, Chowdhury M, et al. Meeting privacy challenges while advancing intelligent transportation systems. *Transport Res C: Emer* 2012; 25: 34–45.

7. Misbahuddin, Syed, et al. IoT based dynamic road traffic management for smart cities. 2015. 12th International Conference on High-capacity Optical Networks and Enabling/Emerging Technologies (HONET). IEEE, 2015.

8. Rizwan, Patan, K. Suresh, and M. Rajasekhara Babu. "Real-time smart traffic management system for smart cities by using Internet of Things and big data." 2016 international conference on emerging technological trends (ICETT). IEEE, 2016.
9. He, Wu, Gongjun Yan, and Li Da Xu. "Developing vehicular data cloud services in the IoT environment." IEEE Transactions on Industrial Informatics 10.2 (2014): 1587-1595.
10. Rakha H and Kamalanathsharma R. Eco-driving at signalized intersections using v2i communication. 2011. 14th international IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC), Washington, DC, 5-7 October 2011, pp.341-346. New York: IEEE.
11. Samadi S. et al. Journal of transportation technologies. 2012. T. 2. №. 03. P. 248.
12. Zyryanov V.V., Inzhenernyj vestnik Dona, 2011, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/709](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/709)
13. Liu, Ying, Lei Liu, and Wei-Peng Chen. Intelligent traffic light control using distributed multi-agent Q learning. 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2017
14. Bui, Khac-Hoai Nam, and Jason J. Jung. Journal of Parallel and Distributed Computing 116 (2018): 89-95.
15. De Souza AM and Villas L. A fully distributed traffic management system to improve the overall traffic efficiency. 2016 ACM international conference on modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, Malta, 13-17 November 2016. New York: ACM.