

УДК 656.11

А.А. ЗАВАДСКИЙ

Брестский государственный технический университет

В.Н. ШУТЬ

Брестский государственный технический университет

## УПРАВЛЕНИЕ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ НА ПЕРЕКРЁСТКАХ ПРИ ПОМОЩИ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

*Рассмотрены сущность и принципы работы мультиагентных систем, формирование пачек в рамках мультиагентных систем; подробно рассмотрен вариант шестиполосного перекрестка с разрешающими знаками поворота со второй полосы; описана работа системы по формированию равновесных пачек на перекрестке; сделаны прогнозы применения мультиагентной системы, а также дальнейшее развитие мультиагентной системы; сделаны выводы по внедрению мультиагентных систем в реальной жизни.*

*Ключевые слова: транспорт, перекресток, мультиагентная система, автомобиль, автомобильная пачка, дорожно-транспортные системы, автоматизация системы дорожного движения, затор.*

A.A. ZAVADSKI

Brest State Technical University

V.N. SHUT

Brest State Technical University

## TRAFFIC MANAGEMENT AT THE INTERSECTIONS USING MULTI-AGENT SYSTEM

*The matter and principles of multi agent system, the formation of pack as a part of multiagent systems are reviewed; the version of the six-lined intersection with permissive signs from the second lane is particularly scanned; system's function of formation equilibrium pack at the intersection is described. Forecasts of use of the multiagent system and the further development of the multiagent system are made; the conclusions about the implementation of multiagent systems in real life are made.*

*Keywords: transport, intersection, multi-agent system, car, car pack, traffic systems, traffic automation system, traffic congestions.*

### Постановка проблемы

В настоящее время транспортные системы играют важнейшую роль в мировой хозяйственной системе. Транспортные системы представляют собой сложные человеко-машинные комплексы, включающие в себя транспортные инфраструктуры, транспортные средства, водителей, пешеходов и другие составляющие дорожного движения, а также множество влияющих факторов. Поддержание высокого уровня безопасности дорожного движения требует постоянного контроля и модернизации транспортной системы.

Существующие попытки автоматизированного контроля дорожного движения рассматривают отдельные транспортные средства, но при этом они не позволяют конструктивно учитывать взаимосвязи между разнородными компонентами дорожного движения. Это делает актуальной разработку новых инструментов и методик контроля и автоматизации системы дорожного движения, позволяющих осуществлять комплексное регулирование в условиях различных дорожных ситуаций, особенно критических (в число которых входит и перекресток).

Современная система дорожного движения, несмотря на ее динамичное развитие, не совершенна, что проявляется, в первую очередь, в автомобильных пробках и заторах, ставших ежедневной реальностью мегаполисов. Несоввершенство работы системы дорожного движения является ключевой причиной снижения продуктивности и потери времени.

Важнейшим узлом дорожно-транспортной системы является перекресток. Именно на перекрестках, как правило, формируются "пробки", причиной которых является увеличение количества автомобилей на дорогах и неспособность управления автомобильным потоком посредством существующего инструментария.

Кроме этого, по причине большого потока автомобилей водители часто разгоняются и резко тормозят, что приводит к дополнительному расходу топлива и снижению уровня безопасности.

Следует отметить, что развитие транспортной инфраструктуры крупных городов требует создания интегрированных систем управления нового поколения, позволяющих определять оптимальные режимы движения транспорта с учетом изменчивости дорожной обстановки, получаемой в ходе оперативного прогноза с использованием современных математических моделей с детализацией до уровня отдельных транспортных средств.

### Анализ последних исследований и публикаций

Система резервирования Техасского университета [12]. Система резервирования – это система, занимающаяся планированием движения транспортных средств через перекресток. Получив запрос резервации от транспортного средства, система резервирования вычисляет параметры в зависимости от текущего состояния перекрестка и высылает ответ для дальнейшего безопасного движения. В случае, если сделать резервацию невозможно, система высылает сообщение об отказе.

Система делит площадь перекрестка на сетку из  $N \times N$  клеток. Каждая клетка может иметь 2 состояния: свободно и занято. Время дискретно и также разделено на участки одинаковой продолжительности. Ресурс резервации представляет собой трехмерное пространство  $N \times N \times T$ . При резервации, количество резервированных клеток должно быть таким, чтобы их площадь могла покрывать площадь габаритов транспортного средства в соответствующем положении.

Резервирование местоположения транспортного средства в определенный момент времени:

Пример показан на рисунке ниже (см. рис. 1). Если хотя бы один кадр симуляции пересекает кадр ресурса резервирования, то резервация транспортного средства не может быть осуществлена на весь путь пересечения перекрестка. В этом случае "кадр" следует понимать, как состояние клеток перекрестка в определенный момент времени.

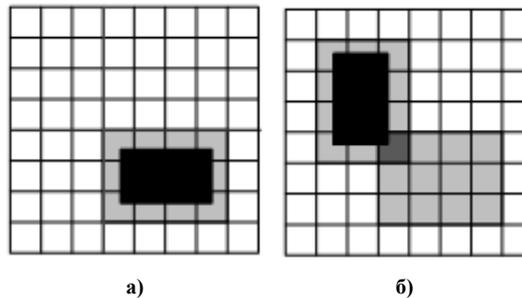


Рис. 1. Возможные результаты резервирования: а) успешная резервация; б) отказ в резервации

### Алгоритм резервирования.

Выделяют следующие пункты алгоритма резервирования:

1. Агент-менеджер на основе параметров агента-водителя симулирует движение транспортного средства через перекресток. В соответствии со всеми параметрами транспортного средства (ускорения, скорости и размеров транспортного средства) агент-менеджер прокладывает предполагаемый путь
2. Агент-менеджер проверяет необходимые для движения клетки в ресурсе резервации
3. Если все клетки симулированного движения свободны, то высылается предложение о резервации агенту-водителю. В противном случае - сообщение об отказе

Таким образом, система резервирования распределяет ресурс резервации для агентов-водителей. Каждая клетка может быть зарезервирована агентом-водителем на определенное время. Для каждой новой заявки на резервацию, агент-менеджер проверяет наличие возможности бронирования определенного пути. Обрабатываются заявки в очередном порядке FIFO (первый пришел, первый ушел).

Недостатки данной системы:

1. Необходимость остановки автомобиля перед перекрёстком в случае отказа в резервировании
2. Система предназначена только для автономных транспортных средств
3. Необходимость вычисления размерности клетки для каждого перекрёстка (размеров одной клетки)
4. Сложность вычислений маршрутов при высокой загрузке перекрёстка
5. Возможность появления коллизий.

### Формулирование цели исследования

Последние достижения в области информационных технологий позволяют предположить, что в скором времени автомобили будут оснащены приборами автономного управления.

Как указывает С.А. Алюшин в своей диссертационной работе "Модели, методы и программные средства построения сложных адаптивных систем дорожного движения", существующие сегодня методики имитации динамической дорожной обстановки не позволяют эффективно решать задачи комплексно; они выполняют исключительно точечные задачи данной области, не принимая при этом во внимание необходимость одновременного удовлетворения двум основным критериям: производительности и реалистичности [1, С. 4].

Как справедливо отмечает В. Шуть, значительные социально-экономические преобразования постоянно предъявляют новые требования к уровню согласованности всех сфер жизнедеятельности, в том числе, в системе дорожного движения. Кроме того, последние десятилетия отмечаются несбалансированностью между потребностями в транспортных услугах и реальными возможностями видов транспорта и дорожной системы. [9, С.193].

Подчеркивая недостатки существующих мер контроля движения, В. М. Маркелов, И.В. Соловьев, В.Я. Цветков говорят о том, что оптимальным подходом реструктуризации и модернизации дорожного движения должны стать качественно новые подходы, одним из которых является применение интеллектуальных транспортных систем. Применение данных систем продиктовано условиями технического развития общества и требованием качественного развития транспортных систем [5, С. 43].

Под интеллектуальными транспортными системами, как правило, понимают системную интеграцию информационных технологий и средств автоматизации с транспортной инфраструктурой, транспортными средствами и пользователями, направленную на повышение эффективности управления дорожным движением и обеспечение безопасности и комфорта участников дорожного движения.

Существенные недостатки имеющихся систем контроля вызывают необходимость изучения новейших технологий регулирования дорожного движения, среди которых наиболее эффективными являются мультиагентные. Потому, изучим сущность данных технологий и принцип их работы на примере конкретного перекрестка.

### **Изложение основного материала исследования Сущность и принцип работы мультиагентных технологий**

Мультиагентные технологии обозначают совокупность технологий разработки и использования мультиагентных систем (Multiagent Systems). В основе мультиагентного подхода лежит понятие мобильного программного агента, который функционирует в качестве самостоятельной специализированной компьютерной программы или элемента искусственного интеллекта.

Мультиагентный подход рассматривается сегодня во всех транспортных системах, даже в рамках управления ресурсами в целях обслуживания космических аппаратов – искусственных спутников Земли [7].

В основе предлагаемой мультиагентной системы управления лежит распределённая система, состоящая из следующих основных компонентов:

- модель города, которая представляет собой электронную карту города, описывающую каждую дорогу в пространстве, с информацией о её форме, ширине и количестве полос;
- глобальная система управления, отвечающая за построение оптимальных маршрутов движения для автомобилей и хранение данных маршрутов с возможной корректировкой;
- подсистема управления перекрёстком, оценивающая дорожную обстановку для приближающихся автомобилей, и отвечающая за образование групп автомобилей для оптимального использования перекрёстка;
- агенты-водители – транспортные средства, взаимодействующие между собой и с вышеперечисленными системами.

Понятие агента используется как инструмент для анализа систем. Для создания транспортной системы на основе мультиагентной системы (далее МАС) необходимо выделить следующие агенты: агент-водитель и агент-менеджер. Агент-водитель – это транспортное средство, управляемое человеком, или автономное транспортное средство. Агент-менеджер – это система, установленная в светофор и осуществляющая управление агентами-водителями.

Основная цель для агента-водителя – достигнуть пункта назначения за минимальное время, при этом, по возможности, использовать самый короткий маршрут, чтобы затрачивать меньше топлива на поездку. Основная цель агента-менеджера – управление агентами-водителями, подъезжающими к перекрестку, их перестроение и создание на перекрестке бесконфликтного и непрерывного проезда транспортных средств.

Схема, представляющая примерное внутреннее устройство агента, а также его положение в среде и взаимодействие с другими агентами, приведена на рис. 2.

Автомобили, будучи агентами, осуществляют обмен сообщениями с навигационным устройством, расположенным на перекрестке и, состоящим из компьютера и беспроводного передатчика. При приближении к перекрестку транспортное средство налаживает контакт с таким устройством.

Для того, чтобы использовать систему, автомобиль посылает сообщение, содержащее несколько параметров:

- время, к которому транспортное средство прибудет к перекрёстку;
- скорость, с которой транспортное средство прибудет;
- направление движения автомобиля;
- максимальная скорость автомобиля;
- габариты автомобиля.

В свою очередь, подсистема управления перекрёстком оценивает дорожную обстановку, моделируя оптимальный разъезд групп транспортных средств для увеличения пропускной способности перекрёстка.

Ключевой характеристикой данной мультиагентной системы является самоорганизация, означающая совокупность динамических и адаптивных процессов, ведущих к возникновению и поддержанию структуры системы без внешнего управления.

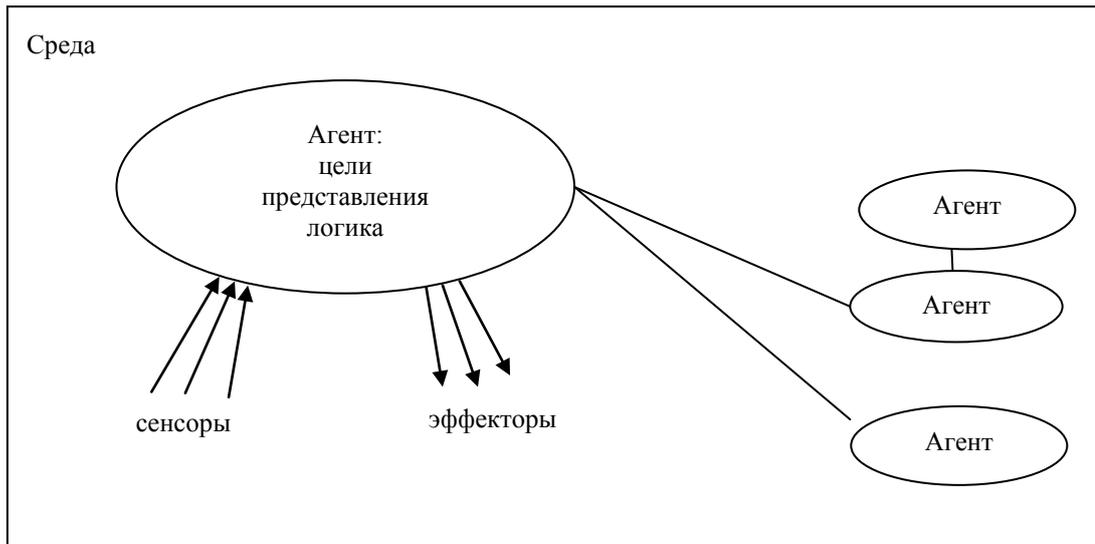


Рис. 2. Внутреннее устройство агента

**Формирование пачек в рамках мультиагентных систем**

Как было отмечено ранее, основной целью рассматриваемой системы управления дорожным движением является оптимизация разбега групп транспортных средств или "пачек".

Большинство исследователей под пачкой подразумевают группу из двух или большего числа взаимодействующих автомобилей, движущихся в одном направлении. Поведение пачки в значительной степени определяется движением ее головного автомобиля, то есть движение пачек подчиняется теории "следования за лидером". Для автомобилей пачки также свойственен динамический характер их взаимодействия – изменение расстояния между автомобилями внутри пачки.

Таким образом, под автомобильной пачкой будем понимать совокупность взаимодействующих транспортных средств, движущихся в одном направлении и принадлежащих к некоторому пространству, в котором определены конкретные интервалы расстояния между элементами.

Автомобильные пачки должны быть сформированы таким образом, чтобы автомобили могли преодолеть перекресток за наименьшее время. Рассмотрим отдельные случаи формирования пачек, а также критерии отнесения автомобилей к ним. На рис. 3 отражен случай приближения пачки автомобилей к пустому перекрестку.

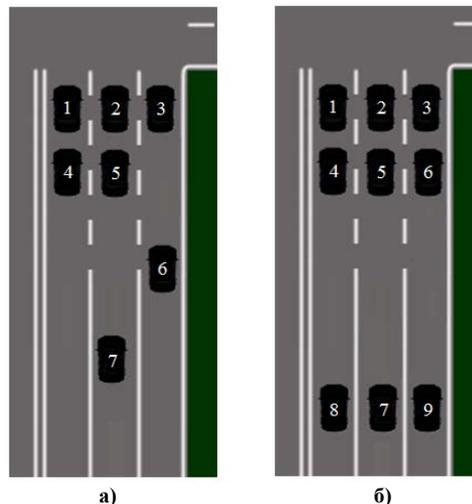


Рис. 3. Приближение автомобилей к пустому перекрестку

Итак, на рис. 3а наблюдается приближение к перекрестку пачки, состоящей из 5 автомобилей – от 1 до 5. При этом автомобили 6 и 7 являются внепачковыми, то есть движущимися по отдельной траектории вне линии безостановочного движения.

Внепачковые автомобили представляют собой автомобили, которые по определенным причинам приходят к стоп-линий на красный сигнал. Зачастую внепачковыми являются автомобили, выехавшие на координированное направление с боковых проездов, пересекающих улиц либо после стоянки-остановки.

Для оптимизации дорожного движения и эффективной работы системы данные автомобили должны войти в состав той или иной пачки. Как показано на рис. 3б, лучшим вариантом будет включение

автомобіля 6, расстояние между которым и пачкой невелико в состав пачки 1-5 путем повышения скорости его езды. Автомобиль 7 правильное отнести к следующей пачке и предложить снизить скорость.

Однако зачастую при приближении уже сформированной автомобильной пачки к перекрестку на нем уже есть автомобили, не успевшие за первый цикл пересечь перекресток (рис. 4).

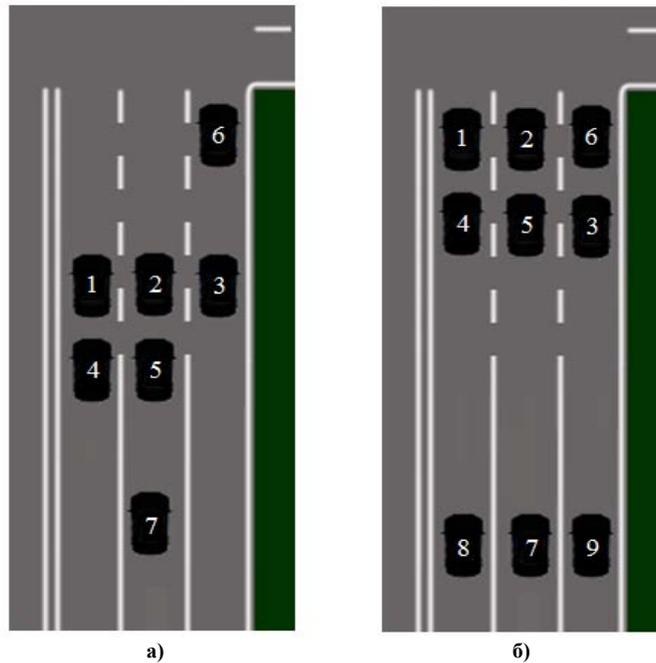


Рис. 4. Приближение автомобилей к перекрестку с автомобилем

В случае, изображенном на рисунке 4а, внепачковый автомобиль 6 становится частью пачки автоматически, причем занимает место "лидера". Автомобиль семь становится часть последующей пачки (рис. 3б). Если же на перекрестке находится несколько внепачковых автомобилей, правильным будет такое включение зеленого сигнала, который позволил бы данным транспортным средствам уйти от стоп-линий раньше приближения переднего фронта координированной пачки, набрать заданную скорость координации и без конфликтов и разрывов слиться с предыдущей координированной пачкой.

Таким образом, система при помощи имитации определяет место транспортного средства в пачке для прохождения перекрёстка с предоставленными параметрами, учитывая уже имеющиеся в пачке автомобили. Если автомобиль приведёт к переполнению пачки – система отклонит запрос автомобиля до следующей итерации создания пачки, в противном случае примет запрос.

**Исходные для изучения движения на перекрестке**

Наиболее полное изучение функционирования может быть проведено лишь при переносе ее действия на конкретный объект. Рассмотрим подробнее вариант шестиполосного перекрестка с разрешающими знаками поворота со 2 полосы.

Транспортные потоки на таком перекрестке отражены на рис. 4.

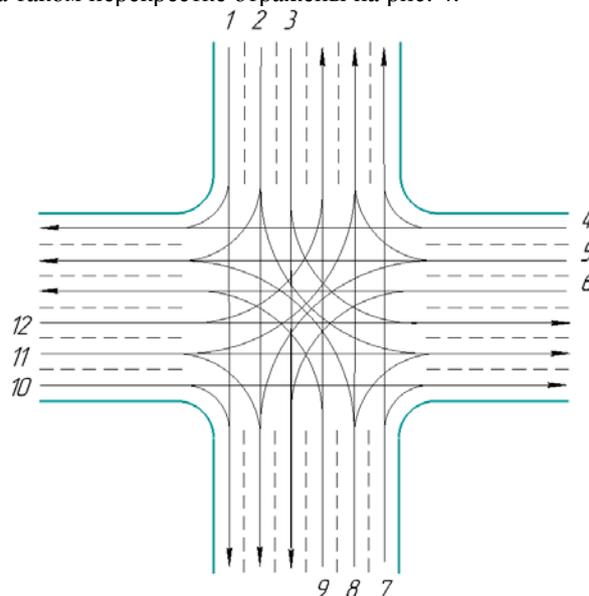


Рис. 4. Транспортные потоки перекрестка

Как видно на рис. 4, в рамках рассматриваемого перекрестка имеется множество конфликтных точек, потому представим граф транспортных потоков на рис. 5.

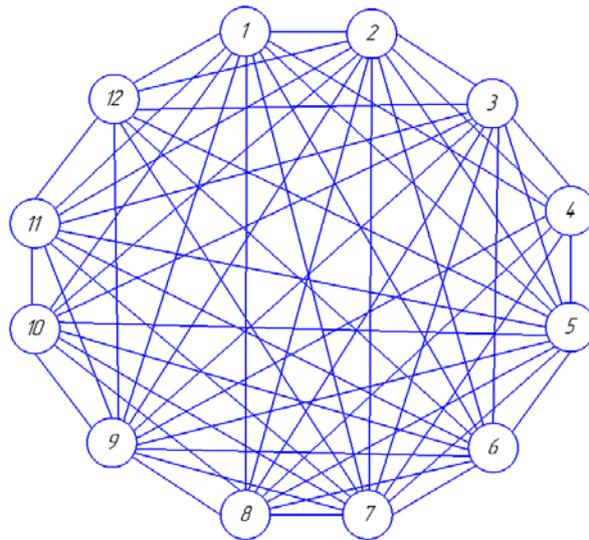


Рис. 5. Граф транспортных потоков

Таким образом, в рамках рассматриваемого перекрестка регулирование должно осуществляться исходя из следующего:

- в крайней правой полосе могут находиться автомобили, поворачивающие направо и едущие прямо;
- в крайней левой находятся автомобили, поворачивающие налево и едущие прямо;
- в центральной полосе могут находиться автомобили, движущиеся в любом направлении.

Отметим также, что при пересечении перекрестка скорость автомобиля уменьшается по формуле [2, С. 236]:

$$v = R \cdot 0,33 \tag{1}$$

Из представленной формулы видно, что скорость имеет прямую зависимость от радиуса окружности, описываемой автомобилем при повороте: чем больше радиус, тем больше и скорость. Из этого следует, что поворот налево сопровождается большей скоростью автомобиля, чем поворот направо. При транзитном движении (движении прямо) можно двигаться вовсе без потери скорости.

Радиусы поворотов автомобилей с разных полос наглядно проиллюстрированы на рис. 6.

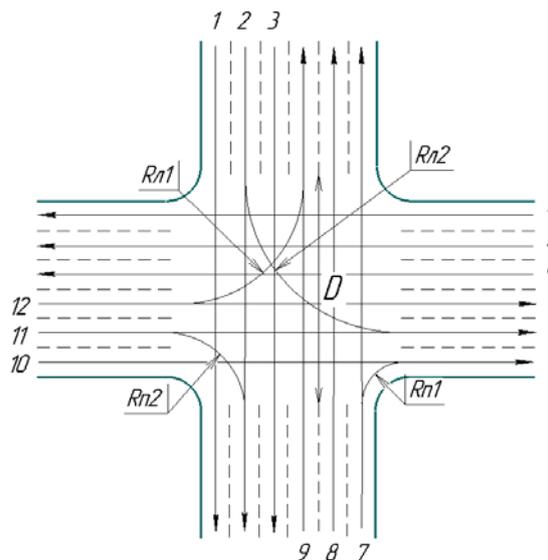


Рис. 6. Радиусы поворотов автомобилей с разных полос

Исходя из размеров радиусов, можно определить за какое время машина преодолет перекресток в каждом из направлений. Основываясь на этих данных, система и производит нормализацию автомобильной пачки.

**Работа системы по формированию равновесных пачек на перекрестке**

Считается, что если доля внепачковых автомобилей превышает величину 0,25, то даже при 100 % координации транзитного и поворотного координированного потоков система координированного регулирования будет считаться неэффективной [3, С. 62], потому рассмотрим подробнее принципы формирования равновесных пачек.

Для эффективной работы системы должно соблюдаться следующее условие: отношение длины пути пересечения перекрестка к скорости по каждой полосе должно быть одинаковым, то есть одинаковым должно быть время переезда перекрестка автомобилями пачки.

Исходя из этого, равновесная пачка автомобилей – это пачка, все автомобили последнего ряда которой пересекают перекресток в одно и то же время, то есть в начальных условиях должно соблюдаться условие:

$$\sum \frac{2\pi R_l}{4 \cdot V_l} \approx \sum \frac{D}{V_m} \approx \sum \frac{2\pi R_n}{4 \cdot V_n} \tag{2}$$

где  $R_l$  – радиус поворота для машин, поворачивающих на перекрестке налево;

$V_l$  – скорость машин, поворачивающих налево;

$D$  – длина пути машин, едущих прямо(транзитно);

$V_m$  – скорость машин, едущих прямо(транзитно);

$R_n$  – радиус поворота для машин, поворачивающих направо;

$V_n$  – скорость машин, поворачивающих направо.

Однако, в условиях ранее описанного перекрестка, позволяющего движение в различных направлениях, для формирования равновесных пачек данное условие должно быть усовершенствовано.

Так, для начала, введем совокупности переменных, выделяющих три основных направления следования автомобилей:  $X_l, X_m, X_p$ :

$X_l$  – совокупность автомобилей конкретной полосы, поворачивающих на перекрестке налево,  $X_l = [1 \dots i]$ ;

$X_m$  – совокупность автомобилей конкретной полосы, едущих прямо (транзитно)  $X_m = [1 \dots j]$ ;

$X_p$  – совокупность автомобилей конкретной полосы, поворачивающих на перекрестке направо  $X_p = [1 \dots p]$ .

Кроме того, согласно рис. 6, радиусы поворотов будут различны не только для движения направо или налево, но и для различных полос, а именно:

$R_{l1}$  – радиус поворота для машин крайней левой полосы (1-ой полосы), поворачивающих на перекрестке налево;

$R_{l2}$  – радиус поворота для машин центральной полосы (2-ой полосы), поворачивающих на перекрестке налево;

$R_{p1}$  – радиус поворота для машин крайней правой полосы (3-ей полосы), поворачивающих на перекрестке направо;

$R_{p2}$  – радиус поворота для машин центральной полосы (2-ой полосы), поворачивающих на перекрестке направо.

В таком случае, приведем формулы для расчета общего времени прохода заданного количества автомобилей, поворачивающих налево, едущих прямо (транзитно) и поворачивающих направо через перекресток для каждой из полос:

а) первая полоса:

$$\Pi_{t1} = \sum_{i=1}^n \frac{2\pi R_{l1}}{4 \cdot V_{li}} \cdot X_{li} + \sum_{j=1}^m \frac{D}{V_{mj}} \cdot X_{mj} \tag{3}$$

б) вторая полоса:

$$\Pi_{t2} = \sum_{j=1}^m \frac{D}{V_{mj}} \cdot X_{mj} + \sum_{i=1}^n \frac{2\pi R_{l2}}{4 \cdot V_{li}} \cdot X_{li} + \sum_{z=1}^p \frac{2\pi R_{n2}}{4 \cdot V_{nz}} \cdot X_{nz} \tag{4}$$

а) третья полоса:

$$\Pi_{t3} = \sum_{z=1}^p \frac{2\pi R_{n1}}{4 \cdot V_{nz}} \cdot X_{nz} + \sum_{j=1}^m \frac{D}{V_{mj}} \cdot X_{mj} \tag{5}$$

При этом для того, чтобы пачка автомобилей считалась равновесной необходимо соблюдение условия:

$$P_{t1} \approx P_{t2} \approx P_{t3} \quad (6)$$

Рассмотрим данное правило в рамках ранее изучаемого перекрестка на рис. 7.

На рис. 7а видно, что перекресток будет пересечен неравномерно. Последние автомобили из столбцов под номерами 1 и 2 начнут движение по перекрестку раньше, чем последний автомобиль из 3-его столбца, то есть отмеченный автомобиль пересечет перекресток последним

Учитывая ранее указанное условие, для эффективного движения необходимо перестроить данную автомобильную пачку так, как показано на рис. 7б.

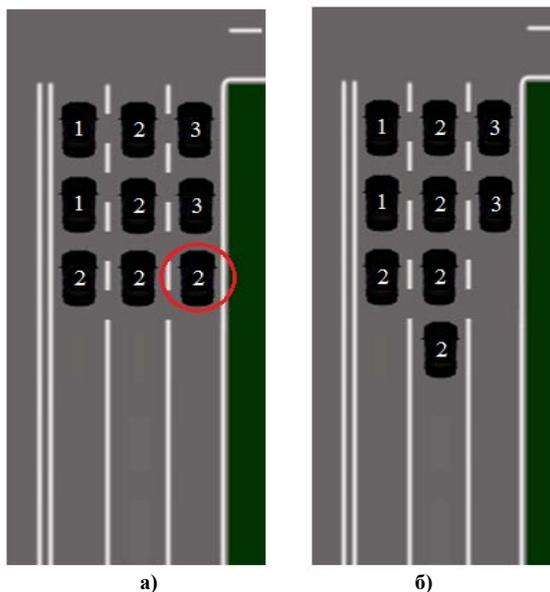


Рис. 7. Автомобильная пачка: а) сформированная; б) равновесная

Сбалансированная таким образом пачка будет равновесной и позволит всем автомобилям одновременно пересечь перекресток, что увеличит его пропускную способность.

Следовательно, предлагаемая схема движения автомобилей на перекрестке, а также ее регулирование по средствам многоагентной системы является наилучшим вариантом организации движения на перекрестке без светофора. В перспективе подобная схема движения станет лучшей альтернативой организации движения автомобильного транспорта на перекрестке.

#### Применение и дальнейшее развитие МАС

Описанная система является эффективным средством управления автономными транспортными средствами, но так или иначе даже при обширном ее распространении будет иметь место "переходный этап", когда часть автомобилей по крайней мере частично будет управляться людьми. В таком случае в программном обеспечении, установленном в автомобиле необходима организация интерфейса, отображающего текущую пачку, в которой находится автомобиль и команды для водителя указывающие полосу, в которую водителю необходимо перестроиться для создания равновесной пачки.

Если водитель не следует командам, отдаваемым ему подсистемой управления перекрестка, его штрафуют на определенное количество баллов. На перекрестках система управления использует алгоритм создания пачек с приоритетом, в котором в первую очередь обрабатываются агенты, у которых наименьшее количество штрафных баллов.

Дальнейшее развитие и совершенствование МАС должно развивать прежде всего адаптивность системы. Данная необходимость заключается главным образом в саморегуляции системы по средствам развития коммуникации "водитель-менеджер", когда водитель может сообщить о невозможности выполняемых команд менеджера. Выполнение данного условия необходимо в случаях, когда команда агента на формирование автомобильной пачки не возможна из-за наличия автомобиля, не оборудованного системой GPS и не является агентом системы. Для этого необходима разработка интерфейса программы, позволяющего передавать сообщения в разрезе коммуникации "водитель-менеджер".

Необходимым принципом дальнейшего развития МАС является принцип комплексности, который предполагает учет всех факторов дорожного движения, в том числе: погодных условий, скорости движения, работы светофоров и т.д.

### Заключення

В цілому, необхідно відзначити високий потенціал МАС в удосконаленні транспортної системи. В частині, рух автомобілів на перехрестках.

Ефективність запропонованої системи обумовлена в такому випадку не тільки енергетичними міркуваннями (економія палива і ресурсів автотранспорту), але і упорядкуванням всієї транспортної системи на основі самоорганізації.

Повсюдне впровадження МАС дозволить оптимізувати поведінку водіїв, підвищити їх дисциплінованість. При допомозі МАС зменшиться кількість ДТП; додатковими перевагами цього підходу вважаються також дешевизна і простота впровадження в існуючу дорожньо-транспортну інфраструктуру.

### Список використаної літератури

1. Алюшин, С. А. Модели, методы и программные средства построения сложных адаптивных систем дорожного движения: автореф. дис. На соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.11 "Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей"; 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (в информационных системах)" / Сергей Александрович Алюшин. — Москва, 2011. — 22 с.
2. Врубель, Ю.А. Характеристики дорожного движения: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 "Организация дорожного движения" / Ю.А. Врубель. — Минск.: БНТУ, 2007. — 268 с.
3. Капский, Д. В. Методика определения экономических потерь при координированном регулировании движения транспортных и пешеходных потоков / Д. В. Капский, Д. В. Навой // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. - 2010. - №4. - С. 60-70.
4. Кухаренок, Г.М. Исследование механизма распада координированной пачки автотранспортных средств при движении на перегоне магистральной улицы / Г.М. Кухаренок, Д.В.Капский, Д.В. Навой, Д.В. Рожанский, В.Н. Шуть // Вестник Брестского государственного технического университета. — 2010. — №15. — С. 63—68.
5. Маркелов, В.М. Интеллектуальные транспортные системы как инструмент управления. Раскрывается содержание интеллектуальных транспортных систем как нового типа систем / В.М. Маркелов, И.В. Соловьев, В.Я. Цветков // Государственный Советник. — 2014. — № 3. — С. 42—49.
6. Портал искусственного интеллекта [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.aiportal.ru/articles/multiagent-systems/theory-agent.html>. — Дата доступа: 03.04.2016.
7. Скобелев, П.О. Мультиагентные технологии и сетевые системы для управления ресурсами в реальном времени / П.О. Скобелев, А.Н. Мочалкин, Д.Е. Новичков, С.И. Залогова, А.В. Рыкин // Радиопромышленность. — 2015. — № 1. — С.113—127.
8. Шуть, В.Н. Мультиагентное управление движением транспортных средств в улично-дорожной сети города / В.Н. Шуть // Искусственный интеллект. — 2014. — № 4. — С. 123—128.
9. Шуть, В.Н. Расширение возможностей оптимального управления транспортными потоками в улично-дорожной сети города / В. Шуть // Електроніка та інформаційні технології. — 2013. — № 3. — С. 193—201.
10. Agent Technology Center интеллекта [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.agents.felk.cvut.cz/>. — Дата доступа: 09.04.2016.
11. Cassenbaum, O. Supervisory control of hybrid powertrains / O. Cassenbaum // Proceedings of the International Congress of Heavy Vehicles, Road Trains and Urban Transport (Minsk, 6-9 October, 2010). — Minsk: BNTU, 2010. — P. 51—59.
12. Dresner, K.A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management / K.A. Dresner // Journal of Artificial Intelligence Research. — 2008. — Vol. 5(7). — P. 21—54.