

УДК 004.021

Е.С. Виноградова, Е.Н. Прошкина  
**МЕТОД АНАЛИЗА И ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
В ПОТОКЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ**

*Пензенский государственный университет,  
Пенза, Россия*

*В статье рассматривается вопрос организации и управления дорожным движением в черте города с использованием современных информационных технологий. Актуальность проводимого исследования обусловлена ежегодным ростом автотранспортного парка и, как следствие, повсеместным и каждодневным возникновением заторовых ситуаций на городских дорогах. Таким образом, данная статья направлена на поиск решения проблемы организации управления городским дорожным движением. Согласно поставленной задаче, производится обзор существующих локальных методов адаптивного управления дорожным движением. На основе проведенного анализа существующих методов адаптивного управления и выявленных характерных особенностей по использованию каждого предлагается новый метод анализа и обнаружения закономерностей в потоке движущихся объектов, разработанный с помощью комбинирования нескольких рассмотренных методов адаптивного управления: метода разъезда очереди и метода поиска разрыва. Данный метод разработан для внедрения в интеллектуальную адаптивную систему управления дорожным движением. Использование данного метода в системе управления дорожным движением оправдано как при высокой, так и при малой загруженности дорожной сети благодаря особенностям работы метода разъезда очереди и метода поиска разрыва. В связи с этим, применение данного метода направлено на снижение вероятности возникновения заторовых ситуаций на контролируемых дорожных участках, а также на повышение эффективности работы системы управления дорожным транспортом.*

**Ключевые слова:** адаптивное управление, методы локального управления, метод поиска разрыва, метод разъезда очереди.

### **Введение**

На сегодняшний день проблема образования пробок и заторов на дорогах страны до сих пор остается актуальной. Заторовые ситуации приводят к экономическим потерям, наносят вред окружающей среде. Ведь доказано, что именно стоя в пробках или перед светофорами, машины выделяют большее количество выхлопных газов, нежели при движении. Также высокая плотность транспортного потока приводит к тому, что средняя скорость транспорта на некоторых магистралях в «час пик» приближается к скорости пешехода [1].

Подобные явления возникают из-за быстрого темпа роста автопарка, а также нерациональной организации светофорного управления дорожным движением. И если не совсем реально избавиться от пробок, то нужно хотя

бы попытаться минимизировать издержки и уменьшить перегрузку транспортной сети.

Заметных улучшений можно добиться в результате принятия мер строительного характера – возведения новых дорог, мостов и магистралей. Но подобные улучшения требуют значительных финансовых вложений и свободных земельных территорий. Чтобы сэкономить ресурсы, необходимо рационально организовать имеющуюся дорожную инфраструктуру. Качественная организация дорожного движения может обеспечить безопасность дорожного движения и увеличить эффективность управления транспортными и пешеходными потоками.

Дорожная сеть, в том числе, нуждается в отказоустойчивых системных комплексах, реализующих эффективные алгоритмы управления транспортными потоками. Таким образом, разработка принципов управления с использованием современных высокоэффективных средств является актуальным направлением в наши дни.

Целью проводимого исследования, описываемого в данной статье, является нахождение оптимального метода управления дорожным движением, способного регулировать транспортные потоки в режиме реального времени.

### **Материалы и методы**

Управление светофорными сигналами на перекрестке осуществляется посредством задания следующих параметров: длительность цикла; длительность фаз; длительность основных тактов; длительность промежуточных тактов; порядок фаз; состав фаз. За счет варьирования данных управляющих воздействий современные АСУДД реализуют три основные стратегии управления в условиях транспортных заторов: нормирование въезда в зону затора; предоставление приоритета в выбранных направлениях; предотвращение блокирования направлений.

Данные критерии чаще необходимы для организации транспортных потоков в дорожной сети. Мы же рассмотрим задачу локального управления с возможным последующим расширением до сетевого управления.

Наиболее часто используемый класс методов адаптивного управления системой управления дорожным движением - локальное управление длительностью цикла и длительностями фаз. Данный класс включает в себя множество методов, например, метод поиска разрыва, метод разъезда очереди, методы расчетного определения длительностей цикла и фаз, метод прогноза прибытий. Приведем краткое описание каждого метода из вышеперечисленных.

Метод поиска разрыва основывается на регистрации момента проезда движущихся последовательно друг за другом транспортных средств. Управляющими параметрами метода являются:

- $t_k^{min}$  – минимальное значение длительности основного такта фазы  $k$ ;
- $t_k^{max}$  – максимальное значение длительности основного такта фазы  $k$ ;
- $t_{эк}$  – экипажное время.

Минимальное значение длительности основного такта рассчитывается с учетом выполнения условия прохождения транспортных средств в количестве, которое определяется расстоянием от стоп-линии до контролируемого сечения. Максимальная длительность такта не должна превышать допустимое время ожидания для направлений, которым движение в фазе  $k$  запрещено. Экипажное время рассчитывается как продолжительность периода проезда транспортного средства от контролируемого сечения до стоп-линии. Данный метод хорошо подходит для работы с потоками относительно малой интенсивности. В случае ситуации возникновения на дороге заторов показатели эффективности метода значительно снижаются.

Метод разъезда очереди, напротив, показывает оптимальные результаты при высоком уровне загрузки контролируемого узла дороги, а также при неравномерном прибытии транспортных средств к регулируемому пересечению [2]. Данный метод требует подсчет длин очередей на направлениях проезда через перекресток. Данный параметр может быть как непосредственно расчетным путем, так и путем сравнения числа автомобилей, прошедших контролируемое сечение и стоп-линию. Длительность основного такта определяется временем разгрузки очереди, скопившейся за время действия фазы запрещающего движения сигнала. Как и в случае с методом поиска разрыва задаются граничные значения длительности основных тактов каждой фазы регулирования.

Методы расчетного определения длительностей цикла и фаз позволяют использовать данные о значениях интенсивности транспортных потоков и интенсивности разгрузки очередей, получаемые в режиме реального времени. Расчет может осуществляться каждый цикл, с использованием данных, накопленных ранее [2]. Либо раз в несколько циклов, но частота пересчета не должна превышать 15 мин. В условиях отсутствия заторов предпочтителен метод минимизации задержки, при противозаторном управлении чаще всего используется метод выравнивания загрузок.

Метод прогноза прибытий оперирует информацией о моментах пересечения транспортными средствами контролируемых сечений. Контролируемый участок в данном случае должен значительно распространяться (примерно на расстоянии 200-300 м) от стоп-линии

перекрестка. С помощью данной информации система управления светофорными объектами прогнозирует момент прибытия транспорта к стоп-линии. Процесс определения оптимальных параметров регулирования условно делится на два этапа. В первом этапе из расчетных методов определяются базовые длительности фаз и цикла. Вторым этапом уточняется момент переключения фазы на основании сделанного прогноза прибытий транспортных средств. Затем, исходя из показателей суммарных величин задержек за период прогнозирования, принимается решение о сдвиге планового момента переключения фаз.

Данные методы локального адаптивного управления имеют как свои достоинства, так и свои недостатки. Опираясь на специфику описанных методов, предлагается совместить метод поиска разрыва и метод разъезда очереди с небольшими дополнениями, который позволит анализировать текущую дорожную обстановку, выявлять закономерности в транспортном потоке и на основе полученных и системно-проанализированных данных применять настройки управления светофорными объектами.

**Метод анализа и обнаружения закономерностей в потоке движущихся объектов.** Разрабатываемый метод агрегирует в себе подходы к решению задачи двух локально-адаптивных методов. Рассмотрим стадии алгоритма производимых вычислений.

Первым этапом перед началом основного такта производится детектирование количества транспортных средств  $N$ , ожидающих разрешающего сигнала и образующих очередь, начиная с первого контролируемого сечения – стоп-линии (Рисунок 1).

Далее, в начале основного такта, производится расчет минимального значения длительности разрешающего сигнала  $t_k^{min}$ . Расчет данного параметра производится на основе количества транспортных средств, которым необходимо проехать расстояние от контролируемого сечения до стоп-линии с последующим ее пересечением [2]. Таким образом, минимальное значение длительности разрешающего сигнала  $t_k^{min}$  напрямую функционально зависит от количества транспортных средств, образующих очередь  $N$  на контролируемом участке.

$$t_k^{min} = f(N) \quad (1)$$

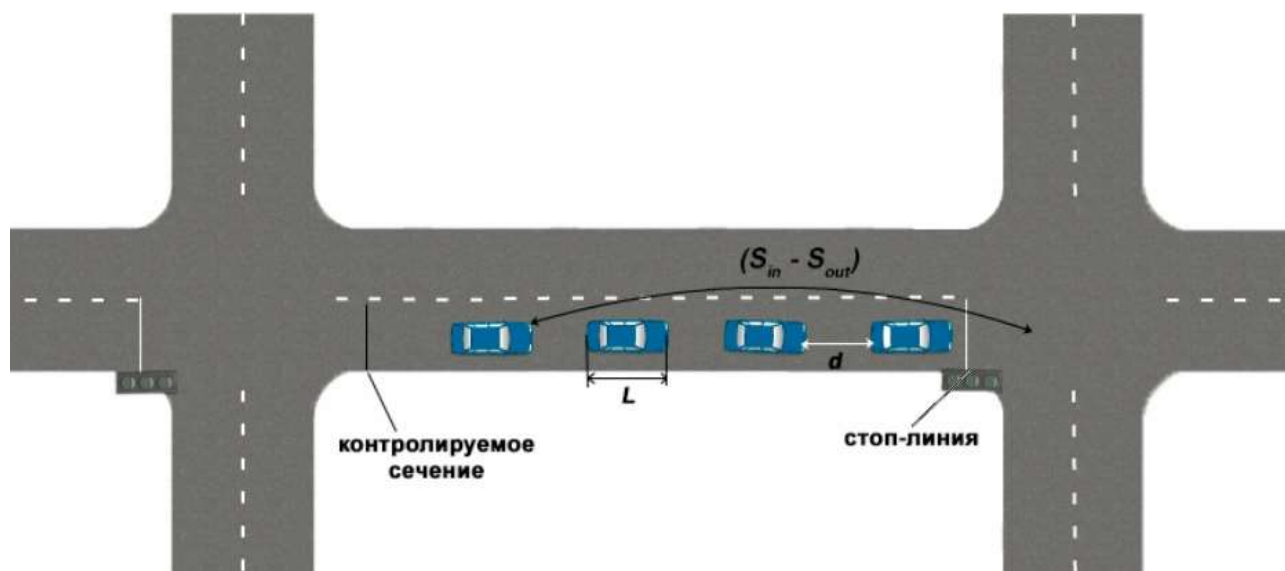


Рисунок 1 – Схема дорожного участка

Чтобы установить минимально допустимое значение разрешающего сигнала  $t_k^{min}$ , необходимо выяснить, сколько времени требуется транспортному средству, подъехавшему последним к фронту очереди, чтобы проехать дорожную развязку. Данная характеристика напрямую зависит от расстояния  $S$ , которое транспортное средство должно преодолеть с момента возобновления движения на разрешающий сигнал светофора до момента включения запрещающего движение сигнала. Место расположения последнего в очереди автомобиля от стоп-линии  $S_{in}$  определяется по следующей формуле:

$$S_{in} = N \times (L + d), \quad (2)$$

где  $N$  – количество автомобилей на одной полосе движения, подъехавших к перекрестку за время одного цикла работы светофорного объекта, ед.;  $L$  – средняя длина легкового автомобиля (в расчетах может быть принята равной 4,5 м);  $d$  – средняя дистанция между автомобилями, стоящими перед перекрестком на запрещающий сигнал светофора (в расчетах может приниматься равной 1 м).

Учитывая задержку транспортного средства перед началом движения на разрешающий сигнал и последующий разгон, определим время  $t_m$ , в течение которого автомобиль достигнет места, дающего ему право на продолжение движения через дорожную развязку, которое по смыслу совпадает с продолжительностью минимальной длительности фазы  $t_k^{min}$ .

$$t_m = \sqrt{\frac{2 \times (S_{in} - S_{out})}{a}} + t_d, \quad (3)$$

где  $(S_{in} - S_{out})$  – расстояние, преодолеваемое автомобилем, находящимся последним в очереди, с момента начала движения на разрешающий сигнал светофора до момента достижения границы, в

которой у транспортного средства не будет технической возможности совершить остановку до стоп-линии, м;  $a$  – ускорение автомобиля, м/с<sup>2</sup> (для расчетов примем среднее значение 1,5 м/с<sup>2</sup>);  $t_d$  – время задержки начала движения последнего в очереди автомобиля, с;

$$t_d = N \times t_d^{cp}, \quad (4)$$

где  $t_d^{cp}$  – средняя продолжительность времени задержки начала движения каждого транспортного средства, находящегося в очереди, с (для расчетов примем среднее значение 1 с);  $S_{out}$  – дальность расположения транспортного средства относительно границы, при пересечении которой транспортное средство имеет право продолжить движение по дорожной развязке, м [3].

$$S_{out} = (t_1 + t_2 + 0.5t_3) \frac{v}{3.6} + \frac{v^2}{26 \times G}, \quad (5)$$

где  $t_1$  – время реакции водителя в сложившейся дорожно-транспортной ситуации, с (для расчетов примем среднее значение 0,6 с);  $t_2$  – время задержки срабатывания тормозной системы транспортного средства, с (для расчетов примем среднее значение 0,1 с);  $t_3$  – период, во время которого транспортное средство замедляется при сложившихся дорожных условиях, с (для расчетов примем среднее значение 0,35с);  $v$  – наиболее вероятная скорость транспортного средства, находящегося последним в очереди, достигнутая им к моменту включения запрещающего движения сигнала, км/ч (для расчетов примем среднее значение 40 км/ч);  $G$  – среднее замедление транспортного средства при включении предупреждающего сигнала, м/с<sup>2</sup>.

Таким образом, параметру  $t_k^{min}$  присваиваем найденное значение  $t_m$ .

В случае, если дорожная развязка подразумевает фазу для перехода пешеходов  $t_k^{пеш}$ , то производится сравнение полученного значения  $t_k^{min}$  с  $t_k^{пеш}$ . Выбирается наибольшее из двух значений параметров.

С началом нового такта в системе фиксируется прохождение транспортными средствами контрольного сечения. Таким образом, каждый автомобиль, проходящий через контрольное сечение в период отработки основного такта, продлевает его минимальную длительность на величину экипажного времени  $t_{эк}$ , в случае, если до окончания основного такта резерв меньше значения  $t_{эк}$ . Тем самым транспортное средство обеспечивает себе проход через стоп-линию во время текущей разрешающей движение фазы.

$$t_k^{тек} = t_k^{min} + t_{эк}, \quad (6)$$

где  $t_k^{тек}$  – текущая продолжительность разрешающего сигнала основной фазы, с. Экипажное время примем как отношение расстояния от

контролируемого сечения до стоп-линии  $S$  к средней скорости движения транспортного средства через контролируемый участок  $v_{cp}$ .

Основной такт заканчивается, если достигнута его максимальная длительность  $t_k^{max}$ , либо, если в контролируемом сечении в течение экипажного времени не появилось ни одно транспортное средство после истечения минимальной длительности разрешающей движение фазы, то есть в потоке появился разрыв [4].

В дальнейшем, при расширении работы алгоритма с локального уровня до сетевого, будет необходимо производить нормирование въезда в зону затора, а так же предотвращение блокирования направлений. Чтобы распределить нагрузку по сети и исключить блокирование дорожных узлов, можно прибегнуть к методу задержки включения разрешающего движение сигнала. Задержка в данном случае будет равна времени распространения фронта разъезда очереди по всему перегону. Либо применить сдерживание входящего в заторовую область транспортного потока с помощью включения в выбранных узлах укороченных разрешающих сигналов:

$$t_G^{short} = t_g^{min} + \left(1 - \frac{I}{100}\right) \times (t_g^n - t_g^{min}), \quad (7)$$

где  $t_G^{short}$  – длительность сокращенного зеленого сигнала;  $t_g^{min}$  – минимальная длительность зеленого сигнала, определяемая экспертом с учетом особенностей строения контролируемого дорожного участка;  $I$  – весовой коэффициент (в случае, если был установлен факт возникновения транспортного затора, коэффициент увеличивается);  $t_g^n$  – нормальная длительность зеленого сигнала (среднестатистическое значение).

В дальнейшем будет разработана адаптивная система управления дорожным движением, которая будет производить расчет длительности разрешающего сигнала по формулам (3) и (6), учитывая насыщенность потока движения. В случае сильной загруженности сети и угрозы блокирования соседних контролируемых дорожных развязок система перейдет в режим укороченных разрешающих сигналов, рассчитываемых по формуле (7).

### **Заключение**

Таким образом, был проведен анализ существующих локальных адаптивных методов управления дорожным движением. Обзор наиболее популярных методов адаптивного управления выявил достоинства и недостатки каждого из них, на основе чего было принято решение о разработке комбинированного метода анализа и обнаружения закономерностей в потоке движущихся объектов. Непосредственная реализация предлагаемого метода будет произведена при разработке приложения интеллектуальной адаптивной системы управления дорожным движением. Применение комбинированного алгоритма на основе метода

поиска разрыва и метода разъезда очереди предполагает обеспечение нормированного движения в условиях малой и средней нагрузки, а в заторовых ситуациях – уменьшение времени ожидания проезда транспортными средствами, находящимися во фронте очереди конфликтующих направлений. Так же данный алгоритм позволит эффективно распределять транспортные потоки по сети с целью предотвращения блокировки движения в контролируемых дорожных узлах, что позволит существенно сократить задержки транспортного движения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимова Е.А. Сравнительный анализ создания имитационной модели пропускной способности городской транспортной сети / Е.А. Ефимова / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 163.
2. Павловская О.Н. Анализ методов локального адаптивного управления длительностью цикла и длительностями фаз / О.Н. Павловская, О.О. Божко / Технические науки. Транспорт. – 2015. – № 4. – С. 15.
3. Городкин В.А. Оптимизация работы светофорного объекта по основным тактам цикла / В.А. Городкин, З.В. Альметова, О.В. Леонова / Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2015. – № 4. – С. 70.
4. Врубель Ю. А. Исследования в дорожном движении : учеб.-метод. пособие к лабораторным работам / Ю.А. Врубель . Минск : БНТУ, 2007. – 178 с.

E.S. Vinogradova, E.N. Proshkina  
**ANALYSIS AND DETECTION OF REGULARITIES IN THE  
STREAM OF MOVING OBJECTS**

*Penza State University,  
Penza, Russia*

*The article examines the management of traffic in the city with the use of modern information technologies. The relevance of the research is due to the annual growth of the number of vehicles and, as a result, the widespread and the everyday occurrence of harsh situations on urban roads. In this way, this article is aimed at finding a solution to the problem of the management of urban traffic. According to the task, an overview of various local methods of adaptive traffic management is being reviewed. Based on the analysis of the existing methods of adaptive control and the revealed specific features on the use of each, a new method for analyzing and detecting regularities in the flow of moving objects is proposed, which was developed by combining several of the methods of adaptive control considered: the queuing method of the queue and the method for finding the discontinuity.*



*This method is designed to be implemented in an intelligent adaptive traffic management system. The use of this method in the traffic management system is justified both for high and low traffic congestion due to the peculiarities of the work of the method of the queue separation and the method of searching for a break. In this regard, the application of this method is aimed at reducing the likelihood of occurrence of harsh situations on monitored road sections, as well as improving the efficiency of the road transport management system.*

**Keywords:** adaptive traffic control system; local control methods; gap control method; queuing method.

## REFERENCES

1. Efimova E.A. Sravnitel'nyy analiz sozdaniya imitacionnoy modeli propusknoy sposobnosti gorodskoy transportnoy seti / E.A. Efimova / Izvestiya visshih uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tehnicheskiye nauki. – 2009. – № 1 (9). – Page 163.
2. Pavlovskaya O.N. Analiz metodov lokal'nogo adaptivnogo upravliniya dlitel'nost'yu tsikla i dlitel'nostyami faz / O.N. Pavlovskaya, O.O. Bozhko / Tehnicheskiye nauki. Transport. – 2015. – № 4. – Page 15.
3. Gorodkin V.A. Optimizatsiya raboty svetofornogo ob'yekta po osnovnim taktam / V.A. Gorodkin, Z.V. Al'metova, O.V. Leonova / Transport. Transportniye sooruzeniya. Ekologiya. – 2015. – № 4. – Page 70.
4. Vrubel Yu. A. Issledovaniya v dorojnom dvizhenii \_ ucheb.\_metod. posobie k laboratornim rabotam / Yu.A. Vrubel . Minsk : BNTU, 2007. – Page 178.