

УДК 656.11:658.012

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЭТАПНОЙ НАСТРОЙКИ СВЕТОФОРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО МАГИСТРАЛИ

С.В. АНФИЛЕЦ, В.Н. ШУТЬ

*Брестский государственный технический университет
Московская, 267, Брест, 224017, Беларусь*

Поступила в редакцию 19 сентября 2011

Существующие методы управления транспортными потоками на магистрали имеют ряд недостатков. Оптимизация управления потоками с помощью адаптивного регулирования предполагает установку детекторов транспорта. Предлагается адаптивный метод на основе поэтапной настройки светофорных объектов по магистральной улице.

Ключевые слова: адаптивное управление, поэтапная настройка, детекторы транспорта, транспортная система, светофорный объект, план координации, импульс интенсивности

Введение

В системе дорожного транспорта, в которой осуществляется около 2/3 всего объема транспортного обслуживания, в той или иной форме работает до 8–10 % трудоспособного населения. В подсистеме дорожного движения, завершающей систему дорожного транспорта, каждый человек, в среднем, ежедневно находится около одного часа, т.е. до 7% своего активного времени. Таким образом, дорожный транспорт и входящее в него дорожное движение являются одной из важнейших систем жизнеобеспечения современного общества. Развитие транспортной инфраструктуры, в том числе развитие улично-дорожной сети, всегда значительно отстает от роста количества автомобильного транспорта. Это приводит к увеличению загрузки уличной сети и снижению эффективности использования транспорта [1] из-за увеличения следующих параметров:

- времени в пути;
- количества незапланированных остановок;
- расхода топлива;
- износа транспортных средств, улиц и дорог и т.п.

В этих условиях постоянно развиваются автоматизированные системы управления движением транспортных и пешеходных потоков в городах. Тенденция развития автоматических систем управления дорожным движением как в настоящее время, так и в перспективе может рассматриваться в двух направлениях.

Первое направление – совершенствование технического обеспечения систем управления за счет развития электронных вычислительных средств, аппаратуры передачи данных, широкого внедрения радиоканалов связи в звене «центр-периферия», в том числе и каналов сотовой связи, внедрения более совершенных средств отображения информации, расширения парка используемых детекторов транспорта, наращивания интеллектуальных возможностей дорожных контроллеров.

Второе направление – наращивание выполняемых функций автоматической системы управления, обеспечивающих повышение качества обслуживания участников движения и внедрение автоматизированных методов контроля за движением. Развитие систем управления по второму направлению производится (и будет производиться) за счет реализации новых алго-

ритмов, соответствующих развивающейся технологии управления движением и сопряжения автоматических систем с другими системами, такими как [2]:

- природоохранные (экологические);
- контроля над выполнением положений ПДД (правил дорожного движения);
- управления городским пассажирским транспортом;
- управления парковками, в том числе: стоянками (уличными, внеуличными), гаражами и паркингами;
- навигации и маршрутного ориентирования.

Практически повсеместно используемое в настоящее время жесткое программное управление светофорными объектами также не способно учитывать кратковременные случайные колебания числа автомобилей, подходящих к перекрестку.

Одним из способов, позволяющих сгладить проблему, связанную с суточными колебаниями интенсивностей, является использование многопрограммного жесткого регулирования [2]. Кроме того, для решения транспортных проблем в настоящее время активно развиваются различные системы адаптивного учета изменений в транспортных потоках.

Целью работ в данной сфере является оптимизация управления транспортными потоками на перекрестках [3]. Используя современное техническое обеспечение, а также алгоритмы адаптивного управления, можно значительно улучшить качество дорожного движения в городе.

Постановка задачи

Магистральные улицы – улицы со стабильно высокой транспортной нагрузкой или улицы с высокой загрузкой полос, как правило, магистрали общегородского, а в крупных городах районного значения. Они характеризуются напряженным движением с довольно высокой скоростью. Повсеместно, кроме разрешенных мест, запрещены остановка-стоянка и движение тихоходного транспорта. Допуск пешеходов на проезжую часть запрещен, кроме регулируемых пешеходных переходов, причем, сделано это посредством ограждений и дорожных знаков на транспортных выездах. При въезде на знака приоритета показана категория улицы.

В настоящее время на магистральных улицах применяется координированное регулирование. Известно, что целью координированного регулирования является обеспечение безостановочного движения транспортных средств вдоль улицы или магистрали. Координированное управление работы соседних светофорных объектов должно обеспечивать уменьшение количества непроизводительных остановок и торможений в потоке, и как следствие, транспортных задержек. Эффективность работы программы координированного управления на магистрали зависит от таких параметров, как расстояния между группами транспортных средств, плотность потока в группе, скорость распада и перемешивания пачек (групп автомобилей).

Однако изменения интенсивности и распределение групп на городских магистралях имеют характер нестационарных случайных процессов, которые не учитываются координированным управлением, что является основным недостатком. Этот недостаток частично компенсируется за счет многопрограммного координированного управления [3]. Еще один метод, который может частично восполнить данный недостаток – это коррекция программ координации. И все же эти методы имеют недостатки, отображающиеся на потоках постоянной интенсивности, но изменяемой структурой распределения пачек в потоке. Возможны варианты, когда устанавливается режим, при котором группа транспортных средств подходит позже начала разрешающего сигнала, тогда длительность фазы будет равна максимально возможной. Второй вариант, когда в установившемся режиме группы транспортных средств подходят до начала разрешающего сигнала. В таком случае происходит неоправданная задержка транспорта, движущегося по магистральной улице.

Предлагается алгоритм адаптивного регулирования, который подстраивается под структуру потока по магистрали. Алгоритм оптимизирует движение по магистрали, отдавая приоритет транспорту, движущемуся в транзитном направлении. Наблюдения на светофорных объектах (СФО) показали, что существующий сдвиг фазы не будет оптимален на всем протяжении суток. В табл. 1 приведены значения количества транспортных средств, проехавших светофорный объект на зеленый сигнал, и количество транспорта, подъехавшего на красный

свет. Из данных видно, что распределение импульса интенсивности в цикле значительно сместилось на запрещающий сигнал. Здесь под импульсом интенсивности следует понимать группу (пачку) компактно прибывших автомобилей к СФО. Расчетное время прихода (по плану координации) должно совпадать с включением зеленой фазы для данной пачки. На практике это не всегда выполняется. По многим причинам пачка может задержаться, либо прийти раньше запрограммированного времени включения зеленой фазы светофора. Эти колебания в течение суток носят стохастический характер и лучший способ к нему приспособиться – это создание адаптивной системы управления.

Укажем несколько причин суточной нестабильности плана координации. Это различное число N_i автомобилей, заполняющих улично-дорожную сеть города в i -ый день (недели, месяца). От плотности заполнения автомобилями улично-дорожной сети города зависит скорость движения, согласно основному закону транспортной теории (выше плотность – ниже скорость) [4], а, следовательно, отсюда идет нарушение плана координации.

Другой причиной нарушения плана координации могут быть дорожно-строительные работы на некоторых участках улично-дорожной сети (УДС). В этой связи даже отдаленное место проведения работ может повлиять на план координации, так как происходит естественное перераспределение транспортных потоков из-за изменившейся в результате строительных работ структуры УДС.

УДС является сложной, динамической системой, которую назовем городской транспортной системой. Под системой понимают множество, элементы которого закономерно связаны между собой [5]. В данном случае транспортная система состоит из УДС (улицы, магистрали), светофоров, дорожных знаков, пешеходных переходов и, собственно, автомобилей.

Срок жизни такой системы – одни сутки. Даже менее суток. Т.е. от момента включения СФО и до их выключения. Каждый день можно говорить о новой транспортной системе. В системах такого рода связи между элементами и событиями в них носят вероятностный характер. Подобные системы являются вероятностными или стохастическими. Отсюда использование в контуре управления городской транспортной системой одного жесткого плана координации не может обеспечить высокую эффективность функционирования системы. В результате растут транспортные пробки, заторы, вынужденные остановки транспорта перед СФО и т.д.

Как любая техническая система, городская транспортная система подвержена сбоям, авариям, так называемым дорожно-транспортным происшествиям (ДТП). В результате ДТП в одном районе города может «сбить» план координации магистрали, даже не проходящей через данный район.

Как и на любую систему, на городскую транспортную систему большое влияние оказывает внешняя среда. План координации, рассчитанный на солнечный день, будет сбиться в пасмурную погоду, так как скорость движения автотранспортных средств (АТС), подходящих к СФО, будет снижена.

Таким образом, такой важный элемент городской транспортной системы, как план координации, очень чувствителен ко многим перечисленным выше факторам, носящим случайный характер. Поэтому необходима постоянная, ежечасная, каждодневная адаптация плана координации путем его подстройки к меняющимся условиям.

Отношение количества машин подъехавших на красный сигнал $N_{кр}$ к количеству машин проехавших на зеленый сигнал $N_{зел}$, характеризуется коэффициентом $k = N_{кр}/N_{зел} = [1,4; 0,68; 0,9; 0,64; 0,77; 0,59; 1,29; 1,22; 0,61; 1,57]$ (табл. 1). Среднее значение за десять циклов $k_{ср} = 0,97$. Ситуация в следующих 10 циклах на данном светофорном объекте сохранилась. Из этого следует, что необходимо ввести смещение так, чтобы увеличить пропуск основной массы транспортных средств за зеленый сигнал.

Таблица 1. Распределение числа транспортных средств в фазе по циклам

Номер цикла	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N_{зел}$	10	19	10	17	13	17	7	9	13	7
$N_{кр}$	14	13	9	11	10	10	9	11	8	11
k	1,4	0,68	0,9	0,64	0,77	0,59	1,29	1,22	0,61	1,57

Таким образом, критерием необходимости новой подстройки СФО является коэффициент k . И если этот коэффициент в некоторый момент времени начинает превышать заранее установленный уровень, то необходимо произвести коррекцию в сдвиге фаз СФО.

При создании адаптивной системы управления дорожным движением необходимо соблюсти принципы сбалансированности. Это включает в циклической реализации функций следующее:

- сбор информации;
- выбор управляющих воздействий;
- реализацию управляющих воздействий.

Все эти функции должны быть сопоставимы друг с другом по уровню качества, так как качество управления будет определяться качеством наихудшей функции.

Предлагаемый в настоящей работе способ адаптивной подстройки СФО по магистрали помимо функций улучшения качества ранее рассчитанного плана координации, а также оперативного отслеживания суточных колебаний транспортных потоков может быть использован самостоятельно для получения неизвестного плана координации. Т.е. метод позволяет заменить расчетный план координации, основанный на информации о расстояниях между СФО, на автоматическое получение плана, который по точности не уступает расчетному. Во всех случаях он лучше расчетного, так как позволяет осуществлять адаптивные вариации.

Алгоритм поэтапной настройки

Современные детекторы транспорта позволяют фиксировать не только наличие транспортных средств, но и подсчитывать их, фиксировать их скорость, а также состав транспортного потока. Предлагаемый алгоритм поэтапной настройки основывается на построении распределения импульса интенсивности в светофорном цикле. Для этого алгоритма предполагается использование в качестве детекторов транспорта системы детектирования на основе видеокamer. Различные алгоритмы цифровой обработки изображений и компьютерного зрения позволяют на сегодняшний день достаточно точно обнаруживать транспортные средства и измерять характеристики транспортного потока [6]. Применение систем видеодетектирования в дорожных контроллерах позволяет определять плотность потока транспортных средств по полосам, скорость и принадлежность к определенному классу, а также осуществлять видеобзор с любой выбранной камеры в реальном времени, проводить сбор и обработку накопленных данных, управлять областями детектирования.

Использование видеодетектирования обеспечивает эффективное управление движением транспортных и пешеходных потоков в городах при помощи средств светофорной сигнализации, видеоконтроля и регистрации нарушений на дорогах, контроля движения маршрутного транспорта.

Детекторы транспорта за дискретные интервалы времени фиксируют количество проходящего транспорта за светофорный цикл. Формируется набор

$$\bar{N}_0 = \bar{N}_1 + \bar{N}_2, \quad (1)$$

где \bar{N}_1 – набор значений интенсивности, характеризующий распределение импульса интенсивности за дискретные интервалы времени dt за разрешающий сигнал светофора; \bar{N}_2 – набор значений интенсивности, характеризующий распределение импульса интенсивности за дискретные интервалы времени dt за запрещающий сигнал светофора.

Первый этап работы алгоритма начинается с достижения таймером времени аналогичному тому, что и в многопрограммном регулировании, т.е. когда предполагается смена транспортной ситуации (данные интервалы времени определяются из предпроектного обследования участка магистрали). На данном этапе определяется коэффициент:

$$k = \sum_{i=1}^{n2} N_{2i} / \sum_{i=1}^{n1} N_{1i}, \quad (2)$$

где $n1$ – число выборок на разрешающий сигнал светофора; $n2$ – число выборок на запрещающий сигнал светофора.

Этот коэффициент определяет отношение интенсивности на запрещающий сигнал к интенсивности на разрешающий сигнал. Если этот коэффициент превышает допустимое значение, определенное для этой улицы, тогда алгоритм переходит ко второму этапу – алгоритму поэтапной настройки. Данный коэффициент определяется для перекрестков находящихся на границе магистральной улицы, которые анализируют входной поток в систему координируемых перекрестков. Возможно вычислять данный коэффициент для каждого перекрестка в системе и сравнивать полученное среднее значение.

На втором этапе начинается поэтапная настройка светофоров по прямой волне. Для первого перекрестка в выбранном направлении определяется распределение импульса интенсивности $\bar{N}_0, \bar{N}_1, \bar{N}_2$.

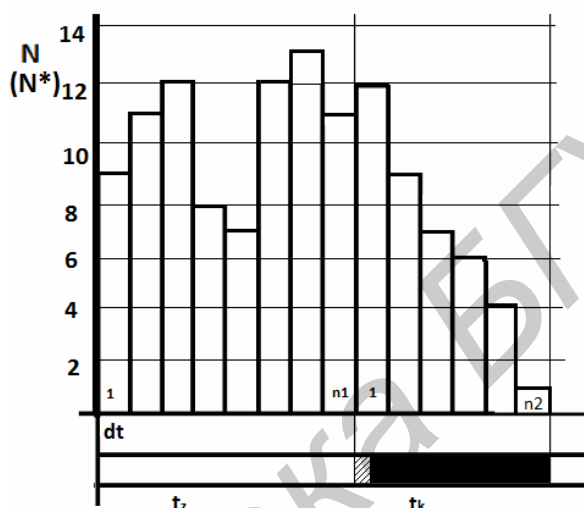


Рис. 1. Распределение импульса интенсивности на подходе к перекрестку

Для обеспечения условия эффективного пропуска транспортного потока необходимо провести операцию центрирования. Суть операции заключается в смещении цикла регулирования относительно входного потока так, чтобы середина распределения импульса интенсивности располагалась в центре разрешающего сигнала (зеленого сигнала светофора). Для этого вводится переходной цикл для данного светофорного объекта. Для того, чтобы внести смещение в существующий план регулирования, длительность переходного цикла необходимо увеличить на рассчитанное значение t_o . По завершении этого переходного цикла устанавливается режим регулирования СФО на основе существующего плана координации.

Для расчета середины распределения импульса интенсивности относительно начала цикла регулирования можно использовать формулу центра масс системы материальных точек [7]:

$$t_c = dt \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{n1+n2} N_{0i} \cdot i}{\sum_{i=1}^{n1+n2} N_{0i}} \right). \quad (3)$$

Следовательно, смещение в цикле регулирования определяется (рис. 2):

$$t_o = \left| \frac{t_z}{2} - t_c \right|, \quad (4)$$

где t_z – длительность разрешающего сигнала.

Соответственно, параметры переходного цикла (T_{tr}, t_{ztr}, t_{ktr}) будут вычисляться по формулам (5)–(7).

Длительность переходного цикла T_{tr} :

$$T_{tr} = T_c + t_o, \quad (5)$$

где T_c – длительность цикла установленная на данном СФО, t_o – смещение в цикле регулирования, определенное ранее.

Длительность разрешающего сигнала в переходном цикле t_{ztr} :

$$t_{ztr} = t_z + \frac{t_o}{2}, \quad (6)$$

где t_z – длительность разрешающего сигнала рассчитанная для данного СФО.

Длительность запрещающего сигнала в переходном цикле t_{ktr} :

$$t_{ktr} = t_k + \frac{t_o}{2}, \quad (7)$$

где t_k – длительность запрещающего сигнала рассчитанная для данного СФО.

В следующий светофорный цикл проверяется условие

$$\left| t_c - \frac{t_z}{2} \right| \leq e, \quad (8)$$

где e – достаточное отклонение середины распределения импульса, с.

Если условие не выполняется, тогда необходимо выполнить пересчет интервала смещения. При успешной настройке данного светофорного объекта на входной поток в выбранном прямом направлении, в следующей фазе алгоритма наступает настройка следующего по порядку в прямом направлении светофора.

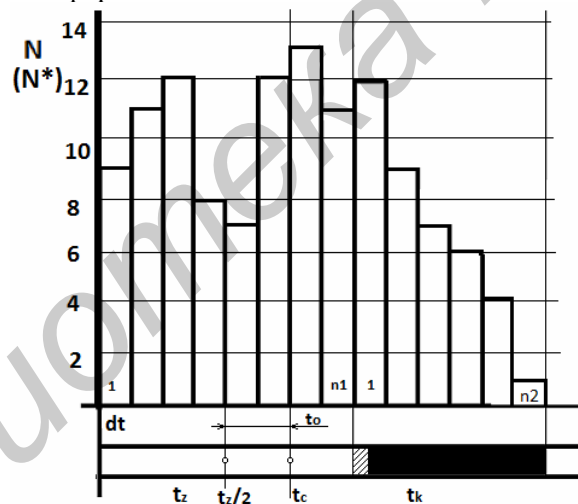


Рис. 2. Определение смещения в цикле регулирования

Таким образом, по всей магистрали настраиваются все светофорные объекты в этом направлении.

На третьем этапе происходит настройка светофорных объектов по обратной волне. Для этого распределение импульса в светофорном цикле заменяется суммарным распределением по обоим направлениям.

$$N_i^* = \{N_{ii}^f + N_{ii}^b\}, \text{ при } i = \overline{1, n1}, \quad (9)$$

где N_i^* – суммарное распределение импульса интенсивности на подходе к перекрестку за разрешающий интервал светофорного цикла; N_{ii}^f – количество транспортных средств, прошедших в прямом направлении за i -ый интервал разрешающего сигнала; N_{ii}^b – количество транспортных средств, прошедших в обратном направлении за i -ый интервал разрешающего сигнала.

Аналогично вычисляется суммарное распределение импульса на подходе к перекрестку за запрещающий интервал светофорного цикла N_2^* . Суммарное распределение импульса интенсивности:

$$N_0^* = N_1^* + N_2^*. \quad (10)$$

Тогда середина суммарного распределения импульса интенсивности относительно начала цикла регулирования рассчитывается:

$$t_c^* = \frac{dt \cdot \sum_{i=1}^{n1+n2} N_{0i}^* \cdot i}{\sum_{i=1}^{n1+n2} N_{0i}^*}. \quad (11)$$

Далее, аналогично с настройкой по прямой волне, по формулам (4)–(8) рассчитываются параметры переходного цикла, тем самым настраивается каждый светофорный объект по магистральной улице в обратном направлении и этим завершается этап настройки по данному алгоритму.

Для алгоритма пофазной настройки после установки в стабильный режим также можно применять алгоритмы для коррекции программы координации для дальнейшего использования детекторов в гибком регулировании. Также возможно использование адаптивных алгоритмов стратегического управления, основанных на прогнозировании характеристик транспортных потоков [8, 9], для более точного определения длительностей фаз вдоль магистрали. Комплексное использование адаптивного алгоритма стратегического уровня и алгоритма поэтапной настройки фазы позволит значительно улучшить качество обслуживания на участке улично-дорожной сети.

Заключение

В условиях постоянной автомобилизации населения и соответственно роста нагрузки на магистральные улицы города, а также в условиях постоянно меняющихся характеристиках транспортных потоков необходимо применение систем координированного регулирования, учитывающих наиболее точно параметры этих потоков. Многопрограммное координированное регулирование частично решает проблемы суточных колебаний в характеристиках транспортных потоков. Но программы координации, установленные на довольно долгий период, устаревают и становятся неэффективными. Постоянный пересчет данных программ тоже требует значительных затрат времени и средств. Требуется установка систем, использующих обратную связь с потоком, которая реализуется средствами детекторов транспорта.

Таким образом, развитие технической базы позволяет совершенствовать алгоритмы адаптивного управления и использовать их для более эффективного решения транспортных проблем. Данная система должна решать оптимизационные задачи, используя текущую информацию о транспортном потоке на основе координированного и адаптивного управления. Существующие современные технологии детектирования позволяют с достаточной точностью определять параметры потоков.

В перспективе необходимо использовать детекторы транспорта не только в алгоритмах адаптивного управления на перекрестке или магистрали, но и в общегородской системе. Например, использовать данные о потоках для разгрузки магистралей и использования менее загруженных улиц. Детекторы могут собирать статистику о потоках, которая потом может использоваться в решениях архитектурно-планировочного характера.

ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM BASED ON A PHASED SET OF TRAFFIC LIGHTS ON MAIN STREET

S.V. ANFILETS, V.N. SHUTS

Abstract

The existing methods of traffic control on main street have several disadvantages. Optimization flow control with adaptive management involves the installation of detectors transport. Adaptive method based on a phased set of traffic lights on main street is proposed.

Литература

1. Воробьев Э.М., Капский Д.В., Мосиенко Ю.И. Автоматизированные системы управления дорожным движением. Мн., 2005.
2. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. Минск, 2003.
3. Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. Технические средства организации дорожного движения. Москва, 2005.
4. Дрю. Д. Теория транспортных потоков и управление ими. М., 1972.
5. Крайзмер Л.П. Кибернетика. М., 1977.
6. Anfilets S.V., Kasyanik V.V., Shuts V.N. Proceedings of the 11th International conference Pattern Recognition and Information Processing. Minsk, 2011.
7. Яворский Б.М., Селезнев Ю.А.. Справочное руководство по физике. Москва, 1989.
8. Анфилец С.В., Касьяник В.В., Шуть В.Н. // Докл. IX Всероссийской научной конференции «Нейро-компьютеры и их применение». Москва, 2011.
9. Massoud Amin S., Rodin E.Y., Liu A-P. et al. // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 1998.