

УДК 656.11:658.012

А.Н. КЛИМОВИЧ, В.Н. ШУТЬ
Брестский государственный технический университет

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТКОМ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ НАСТРОЙКИ ДОРОЖНОЙ РАЗМЕТКИ

Методы управления транспортными потоками имеют ряд недостатков. Предлагается адаптивный метод на основе поэтапной настройки использования переменных схем разметки дороги, входящей в перекресток, с помощью управляемых знаков, что значительно повышает пропускную способность перекрестка, снижает задержку транспорта на светофорных объектах. В работе предложено формульное описание разметки и проведена классификация разметок.

Ключевые слова: адаптивное управление, дорожная разметка, формульная запись разметки, детекторы транспорта, транспортная система, светофорный объект, конкурирующий транспортный поток, пропускная способность полосы движения

A. KLIMOVICH, V. SHUTS
Brest State Technical University

ADAPTIVE ALGORITHM OF ROAD-CROSSING REGULATION ON THE BASIS OF ADJUSTMENT OPTIMIZATION OF ROAD MARKING

The task of traffic regulation in the city remains relevant for many years. Crossroads are places where traffic jams are formed, there is a pollution of exhaust gases and the emergency danger increases. The stochastic nature of the change in the intensities of traffic flows approaching to the intersection from different directions makes difficult the task of the efficient intersection management. Most research in the field of traffic management in the road network is focused on improving management through traffic signal regulation. In this case control actions are changes in such parameters as the duration of the traffic light cycle, the number of traffic lights and their order. Often this set of changes in the parameters of a traffic light object is not enough, and the traffic jam at the intersection keeps growing.

Traffic load image can significantly change during the day, which leads to inefficient use of the bands, some of which can be overloaded, and some can be idle, although its capacity can be used for traffic in the other direction. The paper suggests a method for increasing the throughput of a crossroads by introducing dynamic road markings. We introduce a classification and numerical description for different types of markup. This description represents the throughput in different directions for a given type of markup. Here we give an example of all possible types of marking for a two-lane entrance to the intersection. We propose a method for selecting a specific type of markup depending on the current state of traffic flows. Intersections should be equipped with electronic displays showing the current state of marking, which is determined by dividing the lanes into a direct and opposite direction, as well as by the permitted directions for each lane. The type of markup is selected by the controller installed at the intersection and acting on the basis of the vehicle counting sensors located along the perimeter. The proposed method of organizing traffic allows to increase the throughput of intersections and the transport network in general, to reduce the number of traffic jams and the resulting pollution.

Keywords: adaptive management, road markings, formulaic entry markup, detectors of transport, transport system, traffic light, competing traffic, the throughput of the lanes.

Постановка проблеми

Современное дорожное движение является сложной динамической системой взаимного влияния людей, транспортных средств и элементов дорожной инфраструктуры. Обеспечение быстрого и безопасного движения в таких условиях требует применения комплекса организационных и архитектурно-планировочных мероприятий по обустройству автомобильных дорог, а также применения современных технических средств организации дорожного движения на базе информационных технологий.

При этом имеющийся в настоящее время опыт применения технических средств рассматривает отдельные транспортные средства и не учитывает взаимосвязи между разнородными компонентами дорожного движения [1–2], что делает актуальным разработку новых средств автоматизации дорожного движения (особенно в рамках перекрестков), позволяющих осуществлять комплексное регулирование, исходя из постоянно меняющихся дорожных условий. Несоответствие сложившейся улично-дорожной сети крупных городов условиям насыщенных и перенасыщенных транспортных потоков усложняет движение на регулируемых узлах. Такая ситуация требует переосмысления теории и практики управления уличным движением и применения современных средств и методов управления.

Анализ последних исследований и публикаций

При исследовании заторов, а также при проектировании новых систем управления транспортом особое внимание следует уделять такому элементу дорожного регулирования как перекресток. Перекресток является местом пересечения нескольких путей. Наиболее распространенный перекресток X-образный является местом пересечения двух путей. Здесь наблюдается снижение пропускной способности пути, т.к. часть времени на движение должна быть передана пересекающему (конкурирующему) потоку. Светофорный объект на перекрестке выполняет функцию коммутирующего устройства, предоставляющего поочередное право на движение через перекресток автотранспортным средствам (АТС) с конкурирующих направлений.

Стохастический характер изменения интенсивностей АТС, подъезжающих к перекрестку с различных направлений, делает задачу удовлетворительного, адекватного управления перекрестком трудно выполнимой. Все исследования в области управления транспортными потоками в улично-дорожной сети (УДС) сосредоточены на улучшение управления в узловых точках УДС, посредством светофорного регулирования [3], т.е. идет разрешение ситуации, уже сложившейся на перекрестке и, зачастую, весьма неблагоприятной, с большим числом АТС, остановившихся перед светофором. Управляющими воздействиями в таком случае являются изменения длительности светофорного цикла, такта, число светофорных фаз и их порядка следования [4–5]. Часто этого набора изменений параметров светофорного объекта (СФО) недостаточно, и "пробка" на перекрестке разрастается.

Отказ функционирования транспортной системы наступает в результате заторов на транспортной сети. Появление заторов, когда имеется запас пропускной способности сети, объясняется не только не оптимальностью работы светофорной сигнализации, но и её недостаточностью. Дополнением к регулированию дорожного движения на перекрестке посредством СФО должно стать адаптивное изменение дорожной разметки.

Цель исследования

Разработать адаптивный метод управления транспортными потоками на основе поэтапной настройки использования переменных схем разметки дороги, входящей в перекресток, с помощью управляемых знаков.

Изложение основного материала исследования

Интенсивность движения в городе в течение суток, недели и года меняется в значительных пределах. На изменение интенсивности движения влияют также ДТП (дорожно-транспортное происшествие), закрытие улиц, ремонт проезжей части и другие временные факторы. Поэтому возможно значительное изменение соотношения интенсивности движения по направлениям. Чтобы учесть неравномерность движения, необходима гибкая система, которая позволяет менять направления движения по полосам, например, увеличения интенсивности движения налево требует увеличение количества полос в данном направлении. Система в этом случае с помощью управляемых знаков меняет направление движения по одной из полос и движение налево переходит в режим двухполосного или одна полоса используется для движения прямо и налево.

Возможность использования переменных схем с помощью управляемых знаков и оперативного управления значительно повышает пропускную способность УДС и снижает задержку транспорта, поэтому требует широкого использования в городских транспортных системах.

Постановка задачи. Существующая дорожная разметка имеет ряд недостатков, которые можно свести в две группы:

- недостатки для водителей;
- недостатки для ГИБДД и коммунальных служб.

К основным проблемам, с которыми сталкиваются водители в процессе движения по дорогам со стандартной разметкой, следует назвать ее константность (неизменность).

При движении по перегону к очередному перекрестку водителю неизвестна разметка на этом перекрестке вплоть до момента приезда на него. При этом, в случае, если водитель не был осведомлен о том, что в рамках конкретного перекрестка запрещен поворот в определенном направлении, то возможно ему придется преодолеть дополнительное расстояние до следующего перекрестка, что несет дополнительные временные и материальные затраты.

В рамках второй группы недостатков следует отметить повышенную опасность возникновения дорожно-транспортных происшествий. Так, при движении в потоке (пачке) и приближению к перекрестку водители транспортных средств начинают массово перестраиваться для того, чтобы с минимальными затратами продолжить движение и поддерживать выбранный маршрут. В случае если последующая разметка сильно отличается от предыдущей, или автомобиль меняет направление движения, а также в случае невнимательного отношения водителей к предупреждающим знакам и резкого перестроения, зачастую происходят дорожно-транспортные происшествия (ДТП).

Кроме того, в процессе эксплуатации возникают вопросы о долговечности стандартной разметки. Так, пункт 5.1.10 СТБ 1231-2000 "Разметка дорожная: общие технические условия" утверждает, что: дорожная разметка, выполненная термопластичными, холодными пластичными или другими подобными материалами, должна обладать функциональной долговечностью не менее 1 года, а красками и эмалями – не менее 6 мес. [6].

Однако больший срок не устанавливается, так же как и не устанавливается максимальный срок эксплуатации, что приводит к местам в черте городов, где разметка практически не видна или вовсе отсутствует. Данный недостаток, кроме того, затрагивает и водителей, которые, ничего не подозревая, могут нарушать правила дорожного движения.

Таким образом, наличие ряда недостатков, сдерживающих эффективное осуществление движения транспортных средств по дорогам городов, обуславливает необходимость внедрения новых средств регулирования и контроля. В работе предлагается на перегонах между перекрестками устанавливать электронные табло,

которые будут подбирать разметку под движущиеся в потоке транспортные средства и при необходимости с минимальными перестроениями корректировать движение автомобилей в рамках требуемых полос. При этом водители заранее оповещены о форме разметки на предстоящем по ходу движения перекрестке, так как электронное табло устанавливается на расстоянии $\frac{3}{4}$ от предстоящего по ходу движения перекрестка и у водителей достаточно времени для нужного им перестроения.

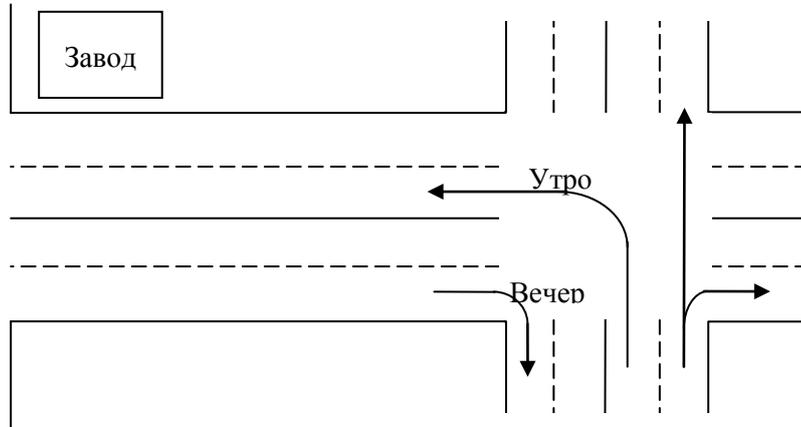


Рис. 1 . Фрагмент УДС.

На рис. 1 и 2 приведен пример, демонстрирующий изменяющуюся разметку в течении дня в зависимости от структуры транспортных потоков в утренние и вечерние часы. На рис.1 изображен фрагмент УДС с явным центром тяготения (завод). В утренние часы АТС с магистрали съезжают на перекрестке налево, чтобы двигаться к заводу. Для утра необходима разметка, изображенная на рис 2а), или б). Причем разметка 2б может пропустить больше левоповоротных автомобилей. В то время как разметка 2в) характерна для вечера. Индикатором смены разметки является информация с детекторов транспорта, расположенных по каждой полосе движения. Например, появление очереди на левоповоротной полосе движения перед перекрестком, зафиксированное детекторами транспорта, будет сигналом для системы управления о смене разметки и увеличения числа полос для этой категории транспорта.

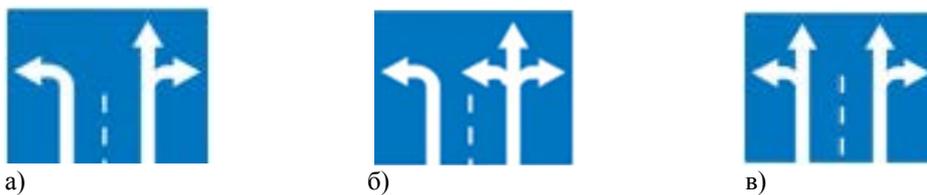


Рис.2. Варианты разметки для представленного фрагмента УДС.

Формульная запись разметки. Для того чтобы эффективно управлять электронным табло переменной разметки, а, следовательно, и перекрестком, необходимо иметь базу данных по всем возможным разметкам. Разметка делается для всех полос одного направления дороги (дорога разделена сплошной линией на прямое и встречное направление). Каждое направление разделено прерывистой линией на полосы движения с нумерацией $i = \overline{1; m}$, начинающейся от правого края бордюра каждого направления дороги. Разметка i -ой полосы это вектор \vec{P}_{ij} , указывающий на одно из трех направлений $j = \overline{1; 3}$ движения транспорта с i -ой полосы перекрестка: направо 1, прямо 2 и налево 3.

Так вектор \vec{P}_{11} указує на рух з першої смуги направо, а вектор \vec{P}_{12} на рух по першій смузі прямо, вектор \vec{P}_{23} указує на поворот з другої смуги наліво. Таким чином, вектор \vec{P}_{ij} розмітки відображає можливість руху в тому або іншому напрямку з кожної з смуг. Розметка для одного напрямку дороги це сукупність \vec{P} векторів \vec{P}_{ij} :

$$\vec{P} = \vec{P}_{11} + \vec{P}_{12} + \dots + \vec{P}_{ij} + \dots + \vec{P}_{m3}, \quad (1)$$

де m – кількість смуг одного напрямку дороги, $i = \overline{1; m}$, $j = \overline{1; 3}$. Тут знак "+" означає не арифметичне сумування, а об'єднання елементів.

На рис. 3а зображено перехресток з розміткою дороги для прямого напрямку руху. На рис. 3б зображено дорожній знак цієї розмітки з формульною його записом. Розставимо дужки в формульній записі цього знака наступним чином $\vec{P} = (\vec{P}_{11} + \vec{P}_{12}) + (\vec{P}_{22} + \vec{P}_{23})$. Тоді сукупність векторів в кожній дужці стосується до однієї смуги руху. Це буде формульним описом окремої смуги руху, тобто, таким чином, в кожній дужці перераховано сукупність векторів, або інакше, напрямків руху з певної смуги. Формули розмітки з групуванням по смузі розташовані в першому стовпці табл. 1.

Можливо варіант групування по напрямку. Якщо при групуванні по смузі визначальним був перший індекс (номер смуги), то при групуванні по напрямку визначальним є другий індекс вектора (напрямок руху). Розставимо дужки в попередньому прикладі наступним чином: $\vec{P} = \vec{P}_{11} + (\vec{P}_{12} + \vec{P}_{22}) + \vec{P}_{23}$. Запис розміток при групуванні по напрямку занесемо в третій стовпець табл. 1.

Тут уже можливі перетворення в вигляді сумування векторів. Вектори \vec{P}_{12} і \vec{P}_{22} мають одне напрямлення 2 (прямо). Замінемо вираження в дужках на узагальнений вектор напрямлення прямо \vec{P}_2 . Також замінемо вектори \vec{P}_{11} , \vec{P}_{23} на \vec{P}_1 , \vec{P}_3 . Тоді отримаємо $\vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3$. Позначимо через p пропускну здатність однієї смуги руху (кількість автомобілів, що проходять через поперечне перерізу смуги в одиницю часу, авт./хв.). Тоді модулі векторів $|\vec{P}_1|$, $|\vec{P}_2|$, $|\vec{P}_3|$ розподіляться наступним чином $0.5p$, p і $0.5p$ (див. рис. 3). Коефіцієнт 0.5 вказує на те, що напрямку 1 (направо), а також напрямку 3 (наліво), в даній розмітці виділено 0.5 смуги. В той же час напрямку 2 (прямо) виділена ціла смуга.

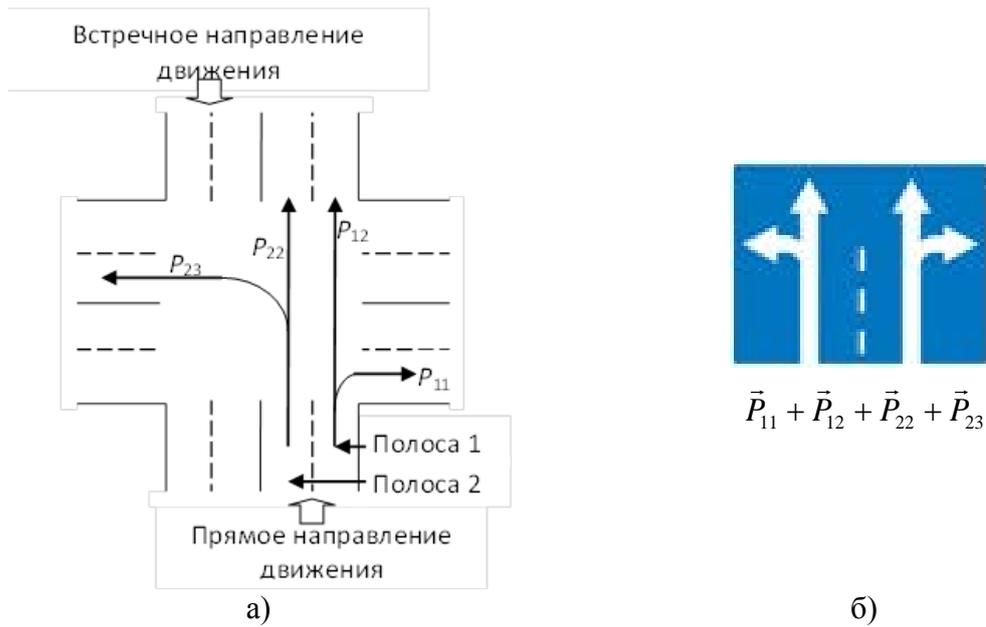


Рис. 3. Пример двухполосного перекрестка и соответствующего ему знака и формульной записи.

Составим упорядоченную тройку из пропускных способностей каждого направления $(|\vec{P}_1|, |\vec{P}_2|, |\vec{P}_3|)$ или $(0.5p, p, 0.5p)$. Выполним нормирование тройки путем деления каждого её элемента на $|\vec{P}| = 2p$ (пропускная способность всего направления движения по всем её двум полосам). Тогда получим $(|\vec{P}_1|/|\vec{P}|, |\vec{P}_2|/|\vec{P}|, |\vec{P}_3|/|\vec{P}|)$ или $(0.5p/2p, p/2p, 0.5p/2p)$, или $(0.25, 0.5, 0.25)$. Упорядоченная тройка $(0.25, 0.5, 0.25)$ является числовой характеристикой конкретной, данной разметки. Каждая координата тройки (w_1, w_2, w_3) указывает на долю w_j , $j = \overline{1;3}$, которую составляет конкретное направление (направо, прямо, налево) в общей пропускной способности всего направления движения. Все тройки внесем в четвертый столбец табл. 1.

Следует отметить, что запись по направлению более информативна, так как позволяет оценить ресурс, выделяемый данной разметкой на то, или иное направление движения. Полученные числовые характеристики можно использовать для адаптивного управления путем подбора наиболее близкой разметки для приближающего к перекрестку потока АТС (пачки АТС). Структура пачки (под структурой понимается соотношение числа авто, разъезжающих на перекрестке направо, прямо и налево) должна совпадать или быть наиболее близкой к структуре разметки.

К перекрестку приближается пачка \vec{X} АТС из n автомобилей $\vec{X} = \vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3$, где $|\vec{X}_1| = n_1$ число авто, которые поедут направо, $|\vec{X}_2| = n_2$ число авто прямо и $|\vec{X}_3| = n_3$ – налево. Составим целевую функцию ситуации от параметра разметки \vec{P} :

$$\min F(\vec{P}) = \|\vec{X} - \vec{P}\| = \|\vec{X}_1 - \vec{P}_1\| + \|\vec{X}_2 - \vec{P}_2\| + \|\vec{X}_3 - \vec{P}_3\| \quad (2)$$

Перейдем к следующей целевой функции от параметра \vec{P} :

$$\min Z(\vec{P}) = \left| \frac{n_1}{n} - \frac{|\vec{P}_1|}{|\vec{P}|} \right| + \left| \frac{n_2}{n} - \frac{|\vec{P}_2|}{|\vec{P}|} \right| + \left| \frac{n_3}{n} - \frac{|\vec{P}_3|}{|\vec{P}|} \right| \quad (3)$$

Минимум целевой функции $Z(\vec{P})$ является минимумом и для функции $F(\vec{P})$, то есть обе функции достигают минимума при одном параметре \vec{P} . Преобразуем выражение (3):

$$\min Z(\vec{P}) = \left| \frac{n_1}{n} - w_1 \right| + \left| \frac{n_2}{n} - w_2 \right| + \left| \frac{n_3}{n} - w_3 \right| \quad (4)$$

Выражение (4) является универсальным инструментом для адаптивного подбора соответствующей разметки под входящим в перекресток транспортный поток. То есть, из всех разметок \vec{P} табл. 1 берется разметка \vec{P}^* , при которой достигается минимум функции $Z(\vec{P})$. Она обеспечивает наиболее быстрый разезд АТС на перекрестке.

Классификация разметок. Составим все возможные разметки для двухполосного входа в перекресток. Число таких разметок составит 17. Все полученные разметки можно классифицировать в три группы (табл. 1): актуальные, форс-мажорные, неактуальные.

К актуальным относятся те разметки, которые используют все три выхода с перекрестка. Это рабочие разметки, которые постоянно в процессе управления перекрестком используются. Частота использования их разная и зависит от структуры транспортных потоков, пересекающих перекресток (здесь под структурой транспортного потока понимается соотношение транспортных средств поворачивающих направо, прямо и налево), то есть конкретному пересекающему перекресток транспортному потоку на электронном табло установлена наиболее близкая ему разметка. «Наиболее близкая» означает, что из всего набора разметок только при этой разметке перекресток покинут все авто за минимальное время.

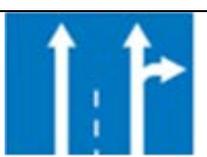
Форс-мажорные разметки используют только два выхода с перекрестка из трех возможных. Данной разметкой один выход с перекрестка закрыт. Эта группа разметок используется не так часто. Только в случае ДТП или при проведении ремонтных работ, чтобы закрыть проезд по улице, относящейся к данному выходу с перекрестка.

Неактуальная разметка имеет только один выход с перекрестка. Эта группа разметок практически не используется. В табл. 1 разметки расположены в порядке уменьшения частоты использования.

Исходя из движущегося к перекрестку в конкретный (текущий) момент времени потока АТС с характеристиками $\vec{X}(n_1, n_2, n_3)$ находится вектор (разметка) \vec{P} путем перебора по табл. 1, чтобы свести к минимуму функцию $Z(\vec{P})$ на основании выражения (4). Перебор делается по числовым характеристикам вектора $\vec{P}(w_1, w_2, w_3)$. Таким образом осуществляется адаптивный подбор наиболее близкой к потоку разметки, которая постоянно сменяется на электронном табло.

Таблиця 1

Формули двухполосных разметок

№	Формула разметки с группировкой по полосе движения	Формула разметки с группировкой по направлению движения	Числовая характеристика разметки (w_1, w_2, w_3)	Дорожный знак
1	2	3	4	5
1	$(P_{11}+P_{12})+(P_{22}+P_{23})$	$P_{11}+(P_{12}+P_{22})+P_{23}$	(0,25 , 0,5 , 0,25)	
2	$(P_{11}+P_{12}+P_{13})+P_{23}$	$P_{11}+P_{12}+(P_{13}+P_{23})$	(0,16 , 0,16 , 0,66)	
3	$P_{11}+(P_{21}+P_{22}+P_{23})$	$(P_{11}+P_{21})+P_{22}+P_{23}$	(0,66 , 0,16 , 0,16)	
4	$(P_{11} + P_{12}) + P_{23}$	$P_{11} + P_{12} + P_{23}$	(0,25 , 0,25 , 0,5)	
5	$P_{11}+(P_{22}+P_{23})$	$P_{11}+P_{22}+P_{23}$	(0,5 , 0,25 , 0,25)	
6	$(P_{11}+P_{12})+P_{22}$	$P_{11}+(P_{12}+P_{22})$	(0,25 , 0,75 , 0)	
7	$P_{12}+(P_{22}+P_{23})$	$(P_{12}+P_{22})+P_{23}$	(0 , 0,75 , 0,25)	
8	$(P_{12}+P_{13})+P_{23}$	$P_{12}+(P_{13}+P_{23})$	(0 , 0,25 , 0,75)	
9	$P_{11}+(P_{21}+P_{22})$	$(P_{11}+P_{21})+P_{22}$	(0,75, 0,25, 0)	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
10	$P_{11}+(P_{21}+P_{23})$	$(P_{11}+P_{21})+P_{23}$	(0,75 , 0 , 0,25)	
11	$(P_{11}+P_{13})+P_{23}$	$P_{11}+(P_{13}+P_{23})$	(0,25 , 0 , 0,75)	
12	$P_{11}+P_{23}$	$P_{11}+P_{23}$	(0,5 , 0 , 0,5)	
13	$P_{11}+P_{22}$	$P_{11}+P_{22}$	(0,5 , 0,5 , 0)	
14	$P_{12}+P_{23}$	$P_{12}+P_{23}$	(0 , 0,5 , 0,5)	
15	$P_{13}+P_{23}$	$(P_{13}+P_{23})$	(0 , 0 , 1)	
16	$P_{11}+P_{21}$	$(P_{11}+P_{21})$	(1 , 0 , 0)	
17	$P_{12}+P_{22}$	$(P_{12}+P_{22})$	(0 , 1 , 0)	

Выводы

Предложенный адаптивный метод на основе поэтапной настройки использования переменных схем разметки дороги, входящей в перекресток, с помощью управляемых знаков, позволяет значительно повысить пропускную способность перекрестка и снизить задержку транспорта на светофорных объектах.

Список использованной литературы

1. 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.
2. Маркелов В.М. Интеллектуальные транспортные системы как инструмент управления / В.М. Маркелов, И.В. Соловьев, В.Я. Цветков // Государственный Советник. — 2014. — №3. — С. 42-49.
3. Кременец Ю.А. Технические средства регулирования дорожного движения / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский. — М.: Транспорт, 1981. — С. 84-116.

4. Анфилец С.В. Адаптивный алгоритм управления на основе поэтапной настройки светофорных объектов по магистрали / С.В. Анфилец, В.Н. Шуть // Доклады БГУИР. — 2011. — № 6 (60). — С. 79-84.
5. Шуть В.Н. Адаптивное управление транспортными потоками в улично-дорожной сети города / В.Н. Шуть — Брест: Издательство БрГТУ, 2015. — 188 с.
6. Anfilets S.V. Shut Evaluating the Effectiveness of the Adaptive Control System in Brest Region / S.V. Anfilets // International Congress of Heavy Vehicles, Road Trains and Urban Transport. — Minsk, 2010. — P. 222–226.
7. Разметка дорожная. Общие технические условия: СТБ 1231-2000. — Введ. 01.01.06. — Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2006. —82 с.

References

1. Vrubel, Yu. A. *Harakteristiki dorozhnogo dvizheniya: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov specialnosti 1-44 01 02 "Organizaciya dorozhnogo dvizheniya"*. BNTU. Minsk. (2007)
2. Markelov, V. M., Solovev, I. V., Cvetkov, V. Ya. *Intellektualnye transportnye sistemy kak instrument upravleniya. Gosudarstvennyy Sovetnik*. **3**, 42-49. (2014)
3. Kremenec, Yu. A., Pecherskiy, M. P. *Tehnicheskie sredstva regulirovaniya dorozhnogo dvizheniya. Transport. Moscow*. (1981)
4. Anfilec, S. V., Shut, V. N. *Adaptivnyy algoritm upravleniya na osnove poetapnoy nastroyki svetofornyh obektov po magistrali. Doklady BGUIR*. **6** (60), 79-84. (2011)
5. Shut, V. N. *Adaptivnoe upravlenie transportnymi potokami v ulichno-dorozhnoy seti goroda. Izdatelstvo BrGTU. Brest*. (2015)
6. Anfilets, S. V. *Shut Evaluating the Effectiveness of the Adaptive Control System in Brest Region. International Congress of Heavy Vehicles, Road Trains and Urban Transport. Minsk*. (2010).
7. *Razmetka dorozhnaya. Obschie tehnicheckie usloviya: STB 1231-2000. — Vved. 01.01.06. Belarus. gos. in-t standartizacii i sertifikacii. Minsk*. (2006)