

## ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ СИНТЕЗА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ ГОРОДСКИХ МАГИСТРАЛЕЙ

Валуев А.М.<sup>1</sup>, Соловьев А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Россия, г. Москва, ул. Бардина, д. 4

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9  
aa.solovjev@yandex.ru, valuev.online@gmail.com

*Аннотация:* Рассматриваются два взаимосвязанных вопроса: 1) о всевозможных распределениях разрешенных траекторий прохождения перекрестка по фазам светофорного цикла и 2) о выборе продолжительности фаз для конкретной схемы пофазного разъезда в зависимости от интенсивности входящих потоков и их распределений по направлениям прохождения перекрестка. Предлагаются способы учета и компромисса между требованиями реализации транспортного спроса и безопасности.

Ключевые слова: регулируемый перекресток, безопасность участка дорожной сети, управление, оптимизация, схема пофазного разъезда, конфликтные точки, светофорный цикл.

### Введение

Движение через регулируемые перекрестки имеют важнейшее значение и с точки зрения использования ресурсов городской дорожной сети (ГДС) в целом, и в отношении безопасности. Основные угрозы безопасности движения через перекресток заключаются в прохождении конфликтных (особых) точек разделения и слияния потоков, значительно реже — точек пересечения, которые почти всегда исключаются на каждой фазе светофорного цикла.

Без изменения дорожной разметки на перекрестке, т.е. при одном и том же наборе допустимых трасс прохождения перекрестка, возможно регулировать движение, добиваясь наиболее приемлемого компромисса между требованиями безопасности и эффективности. Двумя способами такого регулирования является структурный, состоящий в разделении трасс между фазами светофорного цикла и параметрический, состоящий в определении продолжительности каждой фазы. Последние должны определяться интенсивностями входящих потоков и их распределением по направлениям. Задача синтеза регулируемого перекрестка, как мы ее понимаем, как раз и представляет собой комбинацию двух этих задач — разделения трасс по направлениям (в других терминах, определения *схемы пофазного разъезда* [1, с. 5]) и определения параметров светофорного регулирования. Данная задача частично рассмотрена в ранее опубликованных работах [2, 3]. В настоящей публикации представлено развитие данного подхода.

### 1 Свойства регулируемого перекрестка, влияющие на его пропускную способность и безопасность

Перекресток характеризуется множеством направлений движения между входами (на стоп-линиях) и выходами, каждое из которых состоит в прохождении одной или нескольких дорожных полос в области перекрестка. Эти дорожные полосы соединяются или разветвляются на своих концах и могут пересекаться. Оси этих полос далее называются трассами; трассы являются достаточно гладкими регулярными ориентированными поверхностными кривыми. Точки пересечения, слияния или разветвления трасс называются далее особыми точками (ОТ) перекрестка; в литературе они называются также конфликтными точками. Выделяются особые точки трех типов — точки пересечения трасс (ОТП), точки их слияния (ОТС) и разделения (ОТР). Прохождение ОТ, в особенности ОТП и ОТС, составляет основную опасность. В статье [4] отмечается, в частности, повышенная аварийность некоторых перекрестков Тюмени, сопровождающаяся смертельными

случаями; ее авторы считают, что выявление и устранение причин такого положения составляет не только практическую, но и научную задачу. Кроме того, прохождение ОТП и ОТС отрицательно влияет на пропускную способность перекрестка, поскольку при конкуренции автотранспортных средств (АТС) за безопасное прохождение любой ОТП или ОТС одному из конкурирующих АТС необходимо снижать скорость.

Ключевое свойство регулируемых перекрестков состоит в разделении направлений по фазам светофорного цикла. В связи с этим на каждой фазе реализуется ограниченный набор направлений и при таком ограничении в качестве конфликтных точек остаются лишь те ОТ, которые связывают задействованные на фазе трассы. Как правило, при этом исключают ОТП — «просачивание» через них допускается лишь при низкой интенсивности движения [5] и далее рассматриваться не будет.

## **2 Задача и метод построения набора всевозможных безопасных схем пофазного разъезда при заданной системе трасс**

С помощью настройки светофоров при имеющейся дорожной разметке можно организовать несколько схем пофазного разъезда и выбирать для конкретной (или, скорее, типовой) дорожной ситуации ту, которая обеспечивает (при надлежащем выборе длительности фаз) наиболее приемлемое сочетание обеспечиваемой интенсивности движения и его безопасности. Для последней должен использоваться формально определенный показатель, который может быть вычислен на основе расчетных характеристик ТП на отдельных трассах и при прохождении ОТ. Такой подход известен как суррогатная модель оценки безопасности (SSAM) [6, 7].

Для описания совокупности направлений движения на перекрестке естественным является графовое представление. Однако для построения алгоритма выявления всех безопасных схем пофазного разъезда достаточно использовать данные о наличии путей между входами и выходами и о взаимосвязях между отдельными путями, выражающихся в наличии у них общих вершин и их типах (ОТП, ОТР, ОТС). Исследование структуры реальных перекрестков, в т.ч. схем пересечений московских магистралей, позволяет исходить из следующего предположения: между любой парой «вход–выход» либо нет ни одного пути, либо только один. В силу этого предположения взаимное расположение двух путей: может быть одного из перечисленных типов: 1) если у путей различны и начальные, и конечные вершины, то они либо не имеют общих вершин, либо имеют одну вершину — ОТП; 2) если у путей общее начало, то имеется и общий начальный участок, заканчивающийся вершиной — ОТР (или вершиной — ОТР является их начальная вершина; 3) если у путей общая конечная вершина, то имеется и общий конечный участок, начинающийся вершиной — ОТС (или вершиной — ОТС является их конечная вершина этих путей). С помощью обычных вычислительных операций на графовой модели перекрестка выявляются сами пути между начальными и конечными вершинами и характеристика их взаимного расположения. Последняя для пары путей ( $P, Q$ ) выражается показателем  $s_{PQ}$ , равным 0 при отсутствии общих вершин, а при их наличии — наибольшим из значений 1 (при наличии общей ОТР), 2 (при наличии общей ОТС) и 3 (при наличии общей ОТП).

Любая схема пофазного разъезда означает разделение путей между фазами (некоторые пути могут реализовываться и на нескольких фазах). При этом на каждой фазе реализуются либо все пути из определенной входной вершины, либо ни один из них, т.к. организация движения не допускает возможности объезда в очереди на входе. Поэтому для полного определения конкретной схемы пофазного разъезда достаточно разделить входные вершины между фазами, имея в виду, что отнесение вершины к фазе означает, что все начинающиеся в ней пути реализуются на этой фазе. Поэтому на основе показателя  $s_{PQ}$  вводится показатель  $S_{VW}$  взаимного расположения совокупностей путей, начинающихся в вершинах  $V$  и  $W$ . Показатель  $S_{VW}$  равен наибольшему из значений величины  $s_{PQ}$  для пар путей ( $P, Q$ ), первый из которых начинается в вершине  $V$ , а второй — в вершине  $W$ .

Допустимость отнесения двух вершин к одной фазе означает, у совокупностей путей из первой и второй вершины нет общей вершины типа ОТП, а значит,  $S_{VW} < 3$ . Задача определения некоторой схемы пофазного разъезда сводится к разделению множества входных вершин между фазами таким образом, что для любой пары вершин одной фазы  $S_{VW} < 3$ . Задача определения совокупности допустимых схем пофазного разъезда состоит в определении всевозможных таких разбиений вершин по фазам. В более общей постановке находится не разбиение, а *покрытие* множества начальных вершин подмножествами, относящимися к отдельным фазам. В покрытии вершина может присутствовать более чем в одном множестве, т.е., в рассматриваемой задаче, некоторые пути через перекресток могут реализовываться более чем на одной фазе; это действительно случается. Задачу можно решить и прямым перебором; для довольно сложного перекрестка с 14 входами (по 3 или 4 на каждом входном направлении) общее количество подмножеств входных вершин равно 16384, но в

силу условия  $S_{vw} < 3$  количество  $N$  подмножеств, которые могут быть отнесены к одной фазе, будет существенно, по порядку величины, меньше. Для получения осмысленного решения нужно ограничить количество фаз величиной, не превышающей 4, что соответствует обычной практике организации светофорного регулирования. Тогда для определения всевозможных допустимых покрытий множества начальных вершин достаточно проверить  $N^4$  комбинаций допустимых подмножеств, что возможно, но чрезвычайно трудоемко. Нами разработаны более эффективные алгоритмы перебора комбинаций множеств вершин, которые могут быть отнесены к одной фазе. В их основе лежит выделение нерасширяемых допустимых подмножеств, т.е. тех, которые при добавлении любой новой вершины теряют допустимость. Таких множеств будет гораздо меньше, а для их построения может быть использована схема общего алгоритма прохождения дерева в глубину.

### 3 Структурная и потоковая оптимизация светофорного цикла

Разработанный нами метод построения набора всевозможных безопасных схем пофазного разъезда позволяет выработать рекомендации по выбору структуры и параметров светофорного цикла. При этом могут использоваться как априорные оценки безопасности движения через перекресток, так и информация об интенсивности движения через конкретный перекресток — текущая и «историческая», т.е. обобщающая данные наблюдений за длительный период. Под синтезом регулируемого перекрестка здесь понимается использование таких рекомендаций для динамического адаптивного выбора структуры и параметров светофорного цикла для него.

Прохождение точек слияния трасс несет в себе большую опасность, чем прохождение ОТР, поскольку предполагает конкуренцию за порядок их прохождения между подъезжающими автомобилями, которая, при неправильном понимании водителем прав и возможностей — своих и конкурента — угрожает боковым столкновением. К тому же исключение ОТР возможно только радикальным способом, который здесь, по существу, не рассматривается, — полным запретом движения по одной из расходящихся трасс. Последняя возможность может использоваться редко, поскольку она дезориентирует водителей, постоянно проезжающих через данный перекресток. В то же время различие в количестве и расположении ОТС, реализуемых на фазах светофорного цикла, имеет место для разных схем пофазного разъезда.

При менее интенсивном движении, когда потоки по разным направлениям не достигают интенсивности насыщения, следует рекомендовать такое разделение направлений по фазам, которое минимизирует количество реализуемых при этом ОТС. Для сопоставления вариантов целесообразно использовать априорный показатель безопасности, предложенный в работе [8].

Для более интенсивного движения этого недостаточно, т.к. наиболее безопасные схемы могут не обеспечивать прохождение входных потоков. В этом случае должна решаться описанная в [2] задача максимизации показателя безопасности при условии обеспечения прохождения входящих потоков по всем направлениям прохождения перекрестка.

### Литература

1. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. – 69 с.
2. *Валуев А.М., Соловьев А.А.* Оптимизация структуры и параметров светофорного цикла в целях повышения безопасности // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018): труды Одиннадцатой междунар. конфер., 1–3 окт. 2018 г., Москва: в 3 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук; под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Т. 2. – С. 143–148.
3. Вибрационные процессы, виброзащита в машиноведении. Отчет о НИР за 2018г. по теме 6-13 (промежуточный). Часть 2. Динамика мехатронных робототехнических комплексов, динамика транспортных потоков. /Перминов М.Д., Соловьев В.О., Овчинников Н.М. и др. – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2018. – 126 с.
4. *Эртман С.А., Эртман Ю.А.* Надежность и обоснованность оценки опасности перекрестка, полученной в результате камерального анализа данных // Перспективы науки. 2015, № 10 (73). – С. 64–71.
5. *Живоглядов В.Г.* Теория движения транспортных и пешеходных потоков. Ростов н/Д: Известия вузов Сев.-Кавк. региона, 2005. – 1082 с.
6. *Gettman D., Head L.* Surrogate safety measures from traffic simulation models // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2003, № 1840. – P. 104–115.
7. *Vasconcelos L., Neto L., Seco A., Silva, A.* Validation of the Surrogate Safety Assessment Model for Assessment of Intersection // Safety. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2014, № 2432. – P. 1–9.
8. *Соловьев А.А., Валуев А.М.* О структурной сложности и оценивании пропускной способности перекрестка // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): Материалы Девятой международной

конференции: в 2-х томах. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. М.: ИПУ РАН, 2016. – Том II.– С. 98–101.