

## ЗАДАЧИ СИНТЕЗА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ ГОРОДСКИХ МАГИСТРАЛЕЙ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Валуев А.М., Соловьев А.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН  
aa.solovjev@yandex.ru, valuev.online@gmail.com

*Аннотация: Проблема синтеза регулируемых перекрестков городских магистралей рассматривается в двух взаимосвязанных аспектах. Во-первых, решается вопрос о всевозможных распределениях разрешенных траекторий прохождения перекрестка по фазам светофорного цикла — схемах пофазного разъезда. Описывается и иллюстрируется алгоритм решения этой задачи. В результате отбираются возможные схемы пофазного разъезда, в т.ч. с ограничением на количество конфликтных точек слияния потоков. Во-вторых, рассматривается вопрос выбора продолжительности фаз для конкретной схемы пофазного разъезда в зависимости от интенсивности входящих потоков и их распределений по направлениям прохождения перекрестка. Предлагаются способы учета требований реализации транспортного спроса и безопасности и компромисса между ними.*

Ключевые слова: городская дорожная сеть, автотранспортные потоки, регулируемый перекресток, безопасность, управление, оптимизация, схема пофазного разъезда, конфликтные точки, светофорный цикл.

### Введение

Для городской дорожной сети (ГДС) движение автотранспорта через регулируемые перекрестки имеет важнейшее значение и с точки зрения использования ее пропускной способности, и в отношении безопасности. Основные угрозы безопасности движения через перекресток заключаются в прохождении особых (конфликтных) точек слияния и — в меньшей степени — точек разделения потоков. Что касается пересечения трасс, при проектировании организации дорожного движения (ОДД) на перекрестке практически всегда ставится и решается задача исключить одновременное прохождение пересекающихся трасс на каждой фазе светофорного цикла.

Без изменения дорожной разметки на перекрестке, т.е. при одном и том же наборе допустимых трасс прохождения перекрестка, при регулировании движения возможно добиваться наиболее

приемлемого компромисса между требованиями безопасности и эффективности. Двумя способами такого регулирования является структурный и параметрический. Первый состоит в разделении трасс между фазами светофорного цикла и в научной литературе рассматривается крайне редко. Существующие публикации посвящены частным вопросам [1, 2]. Второй состоит в определении продолжительности каждой фазы. Применение обоих способов должно 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* [3, с. 5]) и определения параметров светофорного регулирования. Некоторые подходы к решению рассматриваемой задачи представлены в ранее опубликованных работах [4–6] и развиваются в настоящей работе.

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

Перекресток характеризуется множеством направлений движения между входами, расположенными на стоп-линиях входных полос, и выходами. Каждое из этих направлений состоит в прохождении одной дорожной полосы в области перекрестка или их последовательности. Такие 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 нами особыми точками (ОТ) перекрестка; такое название правомерно при рассмотрении потока через перекресток как динамической системы. В литературе они чаще 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. Об этом свидетельствует, в частности, статья [7], в которой отмечается повышенная аварийность некоторых перекрестков Тюмени, сопровождающаяся смертельными случаями; авторы [7] 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 ОТС одному из конкурирующих АТС необходимо снижать скорость. Снижение скорости требуется и при прохождении ОТР как для АТС, начинающего в данной точке поворот, так и для следующих за ним. Вместе с тем исключение любой ОТР означает изменение ОДД на перекрестке, в связи с чем здесь подробно не рассматривается.

Важнейшее свойство ОДД на регулируемых перекрестках состоит в разделении направлений по фазам светофорного цикла. В связи с этим на каждой фазе реализуется ограниченный набор направлений. 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 [8] и далее рассматриваться не будет.

## **2 Постановка задачи построения набора всевозможных безопасных схем пофазного разъезда при заданной системе трасс и метод ее решения**

С помощью настройки светофоров при имеющейся дорожной разметке можно реализовать несколько схем пофазного разъезда. Из них следует выбирать для типовой дорожной ситуации (или для конкретной ситуации, существенно отличающейся от типовой) 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 конфликтных точек. Такой подход известен как суррогатная модель оценки безопасности (SSAM) [9].

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). Анализ 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 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, при этом некоторые пути могут реализовываться и на нескольких фазах. 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 на определенной полосе. 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,  $S_{VW} < 3$ . Набор входных вершин, порождающих допустимую схему проезда на одной фазе, далее называется бесконфликтным (условно бесконфликтным) множеством. Абсолютно бесконфликтным множеством  $E$  считается то, в котором среди общих вершин путей, начинающихся в  $V \in E$ , нет ОТС; его уровень конфликтности равен 0. Для остальных (условно бесконфликтных) наборов входных вершин уровнем конфликтности считается количество ОТС среди общих вершин путей, начинающихся в  $V \in E$ .

Задача определения некоторой схемы пофазного разъезда сводится к разделению множества входных вершин на бесконфликтные наборы. При этом в качестве дополнительных требований может быть ограничен, в том числе нулем, уровень конфликтности для отдельной фазы, а также сумма уровней конфликтности для совокупности фаз. 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 нередко имеет место. 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.

Решение задачи построения совокупности допустимых СПР как покрытия множества начальных вершин условно бесконфликтными подмножествами (в количестве, не превышающем максимального числа фаз) упрощается, если обратим внимание, что достаточно рассматривать только *нерасширяемые* бесконфликтные множества. К ним относятся те, пополнение которых любой входной вершиной нарушает условие бесконфликтности. Любое такое покрытие, в котором некоторые из вершин входят более чем в одно множество, можно изменить, исключив такую

вершину из одного из множеств. Но это не имеет практического смысла (во всяком случае, когда для всех фаз используются абсолютно бесконфликтные множества), т. к. пути из этих исключаемых вершин ни на одной фазе, на которой они реализуются, не порождают конфликтных точек.

Рассмотрим алгоритм построения допустимых СПР на примере, построенном по типу пересечений московской Профсоюзной улицы с улицей Обручева и Нахимовским проспектом (рис.1).

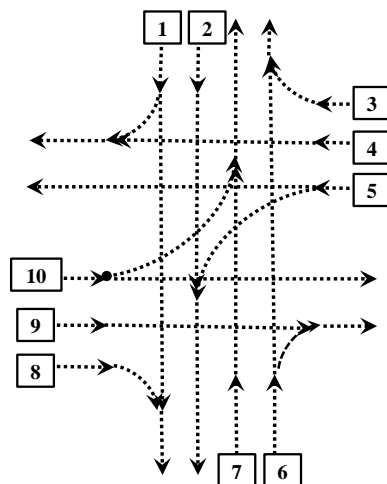


Рис. 1. Система трасс на перекрестке многополосных магистралей

Для разбиения вершин по фазам определим все пары вершин  $(V,W)$ ,  $V < W$ , пути от которых содержат точки пересечения ( $S_{VW}=3$ ) и слияния ( $S_{VW}=2$ ).

3: (1,4), (1,5), (1,9), (1,10); (2,4), (2,5), (2,9), (2,10); (4,6), (4,7), (4,10); (5,6), (5,7), (5,9), (5,10); (6,9), (6,10); (7,9), (7,10).

2: (1,8); (3,6).

Всевозможные бесконфликтные множества можно строить, просто порождая всевозможные множества входных вершин, каждому из которых ставится в соответствие двоичный вектор, длина которого равна числу входных вершин  $N$ , в данном случае  $N=10$ . Для проверки допустимости множества  $E$  нужно попарно проверять значения  $S_{VW}$  для всех  $V, W \in E$ ,  $V < W$ , что для «среднего» количества вершин  $N/2$  составит  $(N/2)(N/2 - 1)/2$  проверок (среднее число проверок на одно множество входных вершин будет больше). Безусловно, количество вычислений при  $N = 10$  остается умеренным. Но если рассматривать не просто единичный перекресток, но целую систему сближенных перекрестков, обеспечивающих разъезд транспортных средств, например, на магистралях Юго-Запада Москвы, размерность возрастет, а увеличение  $N$  до 15, а тем более до 20 кардинально увеличивает объем вычислений.

Предлагаемый алгоритм организует перебор множеств вершин и проверку их допустимости более целенаправленно, представляя совокупность бесконфликтных множеств в виде дерева с корнем — пустым множеством. Вершины дерева первого уровня соответствуют множествам из единичных входных вершин, второго — множества пар, третьего — троек и так далее, до максимального количества входных вершин в бесконфликтном множестве (которое, естественно, в несколько раз меньше  $N$ ). В связи с последним количество перебираемых множеств входных вершин оказывается на порядки меньше их полного количества  $2^N - 1$ . При применении алгоритма условно бесконфликтное множество представляется упорядоченным кортежем вершин  $E = (V_1, \dots, V_m)$  и испытываются множества  $G = (V_1, \dots, V_m, W)$ , где  $V_m < W$ . При этом для проверки условной бесконфликтности и определения уровня конфликтности  $G$  проверяются значения  $S_{UW}$  для  $U = V_1, \dots, V_m$ , т. е. не более  $m$  величин. Для уровня конфликтности  $CL(G)$  условно бесконфликтного множества  $G$  справедлива формула

$$CL(G) = CL(E) + \sum\{1 \mid S_{UW} = 2, U = V_1, \dots, V_m\}.$$

В рассматриваемом примере бесконфликтными множествами являются:

при  $m=2$ : абсолютно бесконфликтными — (1,2), (1,3), (1,6), (1,7), (2,3), (2,6), (2,7), (2,8), (3,4), (3,5), (3,8), (3,9), (3,10), (4,5), (4,8), (4,9), (5,8), (6,7), (6,8), (7,8), (8,9), (8,10), (9,10), с  $CL(E)=1$  — (1,8), (3,6);

при  $m=3$ : абсолютно бесконфликтными — (1,2,3), (1,2,6), (1,2,7), (1,3,7), (1,6,7), (2,3,7), (2,3,8), (2,6,7), (2,6,8), (2,7,8), (3,4,5), (3,4,8), (3,4,9), (3,5,8), (3,8,9), (3,8,10), (3,9,10), (4,5,8), (4,8,9), (6,7,8), (8,9,10), с  $CL(E)=1$  (1,2,8), (1,3,6), (1,3,8), (1,6,8), (1,7,8), (2,3,6);

при  $m=4$ : абсолютно бесконфликтными — (1,2,3,7), (1,2,6,7), (2,3,7,8), (2,6,7,8), (3,4,5,8), (3,4,8,9), (3,8,9,10), с  $CL(E)=1$  (1,2,3,6), (1,2,6,8), (1,2,7,8), (1,3,7,8), (1,6,7,8), (2,3,6,7), (2,3,6,8), с  $CL(E)=2$  (1,3,6,8).

при  $m=5$ : абсолютно бесконфликтных нет, с  $CL(E)=1$  (1,2,3,7,8), (1,2,3,6,7), (1,2,6,7,8), (2,3,6,7,8), с  $CL(E)=2$  (1,2,3,6,8),

при  $m=6$ : абсолютно бесконфликтных и с  $CL(E)=1$  нет, с  $CL(E)=2$  (1,2,3,6,7,8).

Попарное сопоставление бесконфликтных множеств, начиная с максимальных значений  $m$  отдельно для случаев множеств с  $CL(E)=0, 1$  и  $2$  показывает, что нерасширяемыми являются:

абсолютно бесконфликтные множества с  $m=4$ , и только они;

бесконфликтные множества с  $CL(E)=1$ , у которых  $m=5$ , и только они;

единственное бесконфликтное множество с  $CL(E)=2$  — (1,2,3,6,7,8).

Для дальнейшего важно одно свойство. Обозначим  $\dim(E)$  количество элементов во множестве  $E$ ,  $\text{inc}(E, G) = \dim(E \cup G) - \dim(E)$  — приращение количества элементов при присоединении  $G$  к  $E$ . Тогда, очевидно,

$$\dim((E_1 \cup \dots \cup E_M) \cup G) \leq \dim(E_1 \cup \dots \cup E_M) + \max \{ \text{inc}(E_1, G), \dots, \text{inc}(E_M, G) \}$$

Действительно, элементы  $G$ , не входящие в то множество  $E_j$ , на котором достигается максимум величины  $\text{inc}(E_j, G)$  — это самое большее, что может войти в  $(E_1 \cup \dots \cup E_M) \cup G$ , не входя в  $E_1 \cup \dots \cup E_M$ . Отсюда следует, что если для первых  $M$  фаз отобраны множества  $E_1, \dots, E_M$ , то для остальных  $P-M$  фаз нужно отобрать множества  $E_{M+1}, \dots, E_N$ , для которых

$$(1) \quad \dim(E_1 \cup \dots \cup E_M) + \sum_{j=M+1}^P \max \{ \text{inc}(E_1, E_j), \dots, \text{inc}(E_M, E_j) \} \geq N.$$

В частности, для остальных фаз не следует выбирать бесконфликтное множество  $G$ , для которого  $\text{inc}(E_j, G) = 0$  при всех  $j=1, \dots, M$ .

Ограничиваясь рассмотрением нерасширяемых абсолютно бесконфликтных множеств, которые обозначим в порядке их перечисления  $G_1, \dots, G_7$ , вычислим  $\text{inc}(G_j, G_k)$  при  $j, k = 1, \dots, 7, j \neq k$ . Данные сведем в таблицу (табл. 1). В данном случае, поскольку  $\dim(G_j)=4$  для всех  $j$ ,

$$\text{inc}(G_j, G_k) = \dim(G_j \cup G_k) - 4 = \text{inc}(G_k, G_j) \text{ для всех } j, k.$$

Таблица 1. Значение показателя  $\text{inc}(G_j, G_k)$  для всевозможных пар нерасширяемых абсолютно бесконфликтных множеств

j	$G_j$	$k, G_k$						
		1	2	3	4	5	6	7
		(1,2,3,7)	(1,2,6,7)	(2,3,7,8)	(2,6,7,8)	(3,4,5,8)	(3,4,8,9)	(3,8,9,10)
1	(1,2,3,7)		1	1	2	3	3	3
2	(1,2,6,7)	1		2	1	4	4	4
3	(2,3,7,8)	1	2		1	2	3	2
4	(2,6,7,8)	2	1	1		3	3	3
5	(3,4,5,8)	3	4	2	3		1	2
6	(3,4,8,9)	3	4	3	3	1		1
7	(3,8,9,10)	3	4	2	3	2	1	

Определение возможных СПР начнем с пар  $(G_j, G_k)$ , для которых  $\text{inc}(G_j, G_k)$  принимают наибольшие значения. Имеем  $G_2 \cup G_5 = \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$ ,  $G_2 \cup G_6 = \{1,2,3,4,6,7,8,9\}$ ,  $G_2 \cup G_7 = \{1,2,3,6,7,8,9,10\}$ . Для каждой такой пары  $\dim(G_j \cup G_k) = 8$ . В данном случае условие (1) не позволяет отбросить никаких вариантов, и при построении СПР с использованием каждой из перечисленных пар нужно проверять каждое из оставшихся абсолютно бесконфликтных множеств, пытаясь ограничиться тремя фазами, и всевозможные их пары для четырехфазных СПР. Убеждаемся, что трехфазная СПР существует и единственна — это  $(G_2, G_5, G_7)$ , и четырехфазная СПР также единственна — это  $(G_1, G_4, G_5, G_7)$ , если не считать варианты, содержащие  $G_2$ , в которых четвертая фаза — избыточна. Последних вариантов четыре —  $(G_1, G_2, G_5, G_7)$ ,  $(G_2, G_3, G_5, G_7)$ ,  $(G_2, G_4, G_5, G_7)$  и  $(G_2, G_5, G_6, G_7)$ .

В данном случае пара  $(G_5, G_7)$  — элемент любой СПР, поскольку только эти множества содержат соответственно входы 5 и 10.

Вместе с тем недостающие в  $G_5$  и  $G_7$  входы 1,2,6 и 7 содержатся также в условно бесконфликтных наборах входов. Так, при допущении множеств с  $CL(E)=1$  существуют еще две трехфазные СПР, куда вместо  $G_2$  входят  $G_8=(1,2,3,6,7)$  или  $G_9=(1,2,6,7,8)$ . При допущении множеств с  $CL(E)=2$  существует трехфазная СПР, куда вместо  $G_2$  входят  $G_{10}=(1,2,3,6,7,8)$ .

### 3 Структурная и потоковая оптимизация светофорного цикла

Представленный 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.

Преимущество СПР с меньшим количеством фаз вовсе не является бесспорным. В рассматриваемом примере различие между трехфазной и четырехфазной СПР заключается в том, что в первом случае направления проезда с входов 1,2,6 и 7 пропускаются на одной фазе, тогда как во втором проезд со входов 2 и 7 происходит на двух фазах, а с 1 и 6 — на одной. Но, с другой стороны, потоки с входов 3 и 8 для трехфазной СПР пропускаются на одной фазе, а на четырехфазной — на двух. Пусть пропуск через перекресток АТС, поступающих за время  $T$  — длительность светофорного цикла — требует для АТС, входящих во входной вершине  $i$ , времени не менее  $T_i$ . Тогда длительность фаз, соответствующих  $G_5, G_7$ , должна быть не менее соответственно

$$D_{50} = \max\{T_4, T_5\}, D_{70} = \max\{T_9, T_{10}\}.$$

Если при этом

$$(2) \quad T_3 \leq D_{50} + D_{70},$$

и

$$(3) \quad T_8 \leq D_{50} + D_{70},$$

то минимальной длительности последних двух фаз достаточно для пропуска всех АТС с входов 3 и 8, и предыдущие фазы для этого не нужны. В этом случае трехфазная СПР имеет преимущество, т.к. использование пропускной способности перекрестка для пропуска всех АТС с входов 1 и 6 в этом случае выше, а значит, продолжительность первой фазы для трехфазной СПР в этом случае может быть меньше, чем для первой и второй фазы вместе для четырехфазной СПР. Для нее, стало быть, минимально необходимая доля длительности светофорного цикла, обеспечивающая в среднем пропуск потоков по всем направлениям, выше. А значит, при достаточности в среднем пропускной способности перекрестка задержки, с учетом случайных отклонений, будут ниже, и совокупная интенсивность пропускаемого потока при существующем его распределении по направлениям может быть выше. Однако и в этом случае при выполнении ряда условий трехфазная схема не дает преимуществ в сравнении с четырехфазной. А именно, если

$$D_{50} = \max\{T_2, T_7\} \geq T_1 + T_6,$$

то по условиям пропуска потоков с входов 1,2,6 и 7 минимальная совокупная продолжительность первой и второй фазы четырехфазной СПР (определяемых соответственно множествами входных вершин  $G_1, G_4$ ), будет той же, что и для первой фазы трехфазной СПР, а именно равной  $\max\{T_2, T_7\}$ . Однако если хотя бы одно из условий (2), (3) нарушено, то минимально необходимая продолжительность совокупности фаз по условиям пропуска потоков со всех входов для трехфазной СПР будет больше, чем для четырехфазной. Причина этого — в том, что недостающая для пропуска потоков с входов 3 и (или) 8 минимальная продолжительность последних двух фаз для трехфазной СПР может быть получена лишь увеличением продолжительности этих фаз, тогда как для четырехфазной СПР этот недостаток частично или полностью покрывается соответственно продолжительностью первой и (или) второй фазы.

Формально, все условия на минимальные продолжительности фаз могут быть записаны в виде однотипных неравенств по числу входов, в которых в левой части стоят величины  $T_i$ , а в правой — суммы искомым продолжительностей фаз — для тех фаз, на которых происходит проезд перекрестка с данного входа. В рассматриваемом случае для трехфазной схемы:

$$(4) \quad T_1 \geq D_{20}, T_2 \geq D_{20}, T_3 \geq D_{50} + D_{70}, T_4 \geq D_{50}, T_5 \geq D_{50},$$

$$(5) \quad T_6 \geq D_{20}, T_7 \geq D_{20}, T_8 \geq D_{50} + D_{70}, T_9 \geq D_{70}, T_{10} \geq D_{70}.$$

Минимальную продолжительность совокупности фаз находим, минимизируя

$$(6) \quad D_{20} + D_{50} + D_{70}$$

при ограничениях (4), (5), т. е. из решения задачи линейного программирования. Если для ее решения оптимального решения окажется, что

$$D_{20} + D_{50} + D_{70} > T,$$

то это означает, что данная трехфазная схема не обеспечивает прохождения всех входящих потоков в требуемых направлениях. Незначительно увеличить пропускную способность можно увеличением продолжительности светофорного цикла, что, однако, имеет и негативные последствия в виде «гарантированного» увеличения среднего времени ожидания и роста длин очередей, которые могут достигнуть предшествующих перекрестков. Но прежде, чем принимать такое решение, следует сопоставить возможности альтернативных схем пофазного проезда.

Величина, равная разности между минимально необходимой совокупной продолжительности фаз при определенной СПР и длительностью светофорного цикла, является показателем «надежности» данной СПР при известных интенсивностях потоков и их распределением по направлениям. Еще нагляднее относительный показатель, получаемый делением этой разности на длительность светофорного цикла. Этот показатель пригоден для сопоставления эффективности различных СПР в данных условиях и удобен для расчета, т.к. определение условий соответствующих задач линейного программирования малой размерности и их решение имеет совершенно незначительную вычислительную трудоемкость. Кроме того, целевой показатель задачи (но не само решение) непрерывно зависит от параметров — величин  $T_I$  — а значит, выбор наиболее надежной и эффективной СПР может оставаться постоянным в течение значительных промежутков времени, пока транспортная ситуация мало изменяется. Более того, выбор не изменится при изменении интенсивности входных потоков, но их стабильном распределении по направлениям. Чтобы убедиться в этом, разделим все неравенства (4), (5) и условие оптимальности (6) на  $\sum_{i=1}^N T_I$  и в качестве искомым переменных выберем

$$d_k = D_k / \sum_{i=1}^N T_I.$$

В получающейся задаче все параметры в первом приближении уже не будут зависеть от интенсивности потоков, а только от их распределения по направлениям, что и обеспечит в рассматриваемом случае стабильность выбора.

Может оказаться, что никакая СПР, основанная только на нерасширяемых абсолютно бесконфликтных множествах входов для каждой фазы, не обеспечивает пропуска всех входящих потоков. В этом случае к рассмотрению должны приниматься и траектории проезда, содержащие точки слияния потоков. При этом, однако, следует рекомендовать такое разделение направлений по фазам, которое минимизирует количество реализуемых при этом ОТС, поскольку прохождение точек слияния трасс несет в себе большую опасность, чем прохождение ОТР, предполагая конкуренцию за порядок их прохождения между подъезжающими автомобилями, которая, при неправильном понимании водителем прав и возможностей — своих и конкурента — угрожает боковым столкновением. Задача выбора СПР и ее параметров становится в данном случае двухкритериальной. Сам набор вариантов СПР порождается вышеописанным способом, если принимать к рассмотрению также полностью или частично условно бесконфликтные множества входов. Для сопоставления вариантов, помимо введенного показателя надежности, целесообразно использовать априорный показатель безопасности, предложенный в работе [10]. Возможно ограничиться сведением к описанной в [5] задаче максимизации показателя безопасности при условии обеспечения прохождения входящих потоков по всем направлениям прохождения перекрестка.

Исключение ОТР также возможно, но только радикальным способом — полным запретом движения по одной из расходящихся трасс. Оно может допускаться лишь в том случае, если потоки с запрещенных (для определенных въездных полос) направлений можно так перераспределить между другими полосами, что при таком перераспределении обеспечивается надежное прохождение всех потоков. Но предполагаемый выигрыш в безопасности связан с нежелательными побочными эффектами. Временный запрет на проезд по одной из трасс дезориентирует водителей, постоянно проезжающих через данный перекресток, и маловероятно, что все они, даже зная наперед о введенном изменении, скорректируют свое поведение в части выбора въездной полосы.

## Заключение

В настоящей работе показано, что наряду с параметрическим управлением прохождением перекрестка — выбором продолжительности фаз светофорного цикла — возможно на регулярной основе осуществлять и структурное управление. Предложена постановка задачи рационального выбора схемы пофазного проезда и метод ее решения. Осуществление такого подхода возможно при регулярном мониторинге транспортных потоков, который постепенно становится нормой для важнейших магистралей.

## Литература

1. *Qu Z., Bai Q., Chen Y., Cao N., Xiong S.* Optimal design of left-lane line extensions considering non-yielding maneuvers at the beginning of the permitted phase // *Journal of Southeast University (English Edition)*. Vol. 34. 2018, No. 1. – P. 120-126
2. *Bryant C. W., Rakha H. A., El-Shawarby I.* Study of truck driver behavior for design of traffic signal yellow and clearance timings // *Transportation research record*. Vol. 2488. 2015, No. 1. – P. 62–70.
3. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. – 69 с.
4. Вибрационные процессы, виброзащита в машиноведении: Отчет о НИР за 2015 г. по теме 6-13 (промежуточный). Часть 2. Динамика транспортных потоков, научные основы проектирования оптимальных дорожных сетей / Перминов М.Д., Соловьёв В.О., Панкова Н.В., Соловьёв А.А., Кельнер М.С., Бармина О.В., Валуев А.М., Евин И.А., Воробьев А.Э., Тищенко В.С. — М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. 2015. — 57 с.
5. *Валуев А.М., Соловьёв 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. М.: ИПУ РАН, 2018. – Т. 2. – С. 143–148.*
6. 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., Соловьёв В.О., Овчинников Н.М. и др. – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2018. – 126 с.
7. *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.
8. *Живоглядов В.Г.* Теория движения транспортных и пешеходных потоков. Ростов н/Д: Известия вузов Сев.-Кавк. региона, 2005. – 1082 с.
9. *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.
10. *Соловьёв 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.*