

УДК 656.021: 519.872.6

# СТРУКТУРНОЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМ ПОТОКОМ ЧЕРЕЗ ПЕРЕКРЕСТОК

**А.А. Соловьев**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН*  
Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4  
*Московский физико-технический институт (государственный университет)*  
Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9  
E-mail: [aa.solovjev@yandex.ru](mailto:aa.solovjev@yandex.ru)

**А.М. Валуев**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН*  
Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4  
E-mail: [valuev.online@gmail.com](mailto:valuev.online@gmail.com)

**Ключевые слова:** транспортные потоки, управление автотрафиком, регулируемый перекресток, безопасность дорожного движения, оптимизация, схема пофазного разъезда, суррогатная модель оценки безопасности (SSAM), имитационное моделирование.

**Аннотация:** Вводится и иллюстрируется на примерах московских магистралей теоретико-графовая модель перекрестка. На ее основе формулируются условия разделения направлений его прохождения по фазам светофорного цикла — выбора схемы пофазного разъезда по условиям безопасности. Ставится задача параметрической оптимизации светофорного цикла по критерию безопасности на основе концепции SSAM, при обеспечении потребностей на прохождение перекрестка во всех направлениях.

## 1. Введение

В крупных городах большая часть транспортных потоков (ТП) проходит через регулируемые перекрестки главных магистралей с многополосным движением, что определяет эффективность использования городской дорожной сети (ГДС) и безопасность движения. Схемы движения на таких перекрестках весьма разнообразны и практически не повторяются. Разделение трасс движения через перекресток по фазам – т.н. схема пофазного разъезда [1, с. 5] - не определяется однозначно системой трасс, и эта неоднозначность может быть использована для управления прохождением ТП через перекресток на структурном уровне. Структурное управление в совокупности с параметрическим управлением на основе установления продолжительности фаз дает возможность сочетать эффективное использование пропускной способности перекрестка с высокой степенью безопасности.

В настоящей работе система дорог и их разметка считаются заданными, рассматривается оценка и выбор структуры светофорного цикла (ССЦ), т.е. набора его фаз и соответствующих им схем (множеств направлений) проезда на каждой фазе, в совокупности покрывающих все множество разрешенных направлений движения на перекрестке (с детализацией до дорожных полос). Для реализации рассматриваемых способов управления движением через перекресток достаточно использования светофорной сиг-

нализации, а для более эффективного доведения действия системы управления до водителей ее целесообразно дополнить онлайн-информированием.

## 2. Модель организации движения через перекресток

На допустимых траекториях движения через область перекрестка выделяются особые точки (ОТ), называемые также конфликтными точками, в которых они разделяются, соединяются или пересекаются (ОТР, ОТС, ОТП). Охарактеризуем ориентированный граф перекрестка  $G$ . Его дуги соответствуют участкам дорог (дорожных полос), в пределах которых отсутствуют ОТ. Таким образом, вершинам  $G$  соответствуют: 1) участки стоп-линий в пределах дорожных полос перекрестка, начинающихся на его границе (начальные вершины); совокупность таких вершин обозначаем  $V_{IN}$ ; это множество входов для перекрестка; 2) концы дорожных полос перекрестка, заканчивающихся на выходе из области перекрестка; совокупность таких вершин обозначаем  $V_{OUT}$ ; это множество выходов для перекрестка; 3) особые точки; совокупность таких вершин обозначаем  $V_{SP}$ .

При этом ОТ типа разделения представляются вершинами, имеющими одну входящую дугу и более одной выходящей, ОТ типа слияния — имеющими одну выходящую дугу и более одной входящей, ОТ типа пересечения — имеющими более одной входящей дуги и более одной выходящей.

Из назначения перекрестка вытекает, что:

1. Все пути по  $G$  (т.е., содержательно, траектории прохождения перекрестка), начинающиеся на входах в него, заканчиваются на выходах (назовем их полными путями), а все прочие пути входят в один из полных путей.
2. Из любого входа есть пути в некоторое множество выходов и, напротив, в любой выход есть путь из какого-либо входа.

Схема пофазного разъезда — это *покрытие* совокупности полных путей  $A_{FP}$ , т.е. семейство множеств полных путей  $A_{FPk}$ , относящихся к отдельным фазам, объединение которых составляет всю совокупность полных путей. Оно должно обладать специальным свойством С1: в любое  $A_{FPk}$  входят либо все пути, начинающиеся в некоторой вершине  $j$  (обозначим их множество  $A_{PVj}$ ), либо ни один из них (при невыполнении С1 автомобили, входящие через вершину  $j$ , не могли бы разъехаться на зеленый свет).

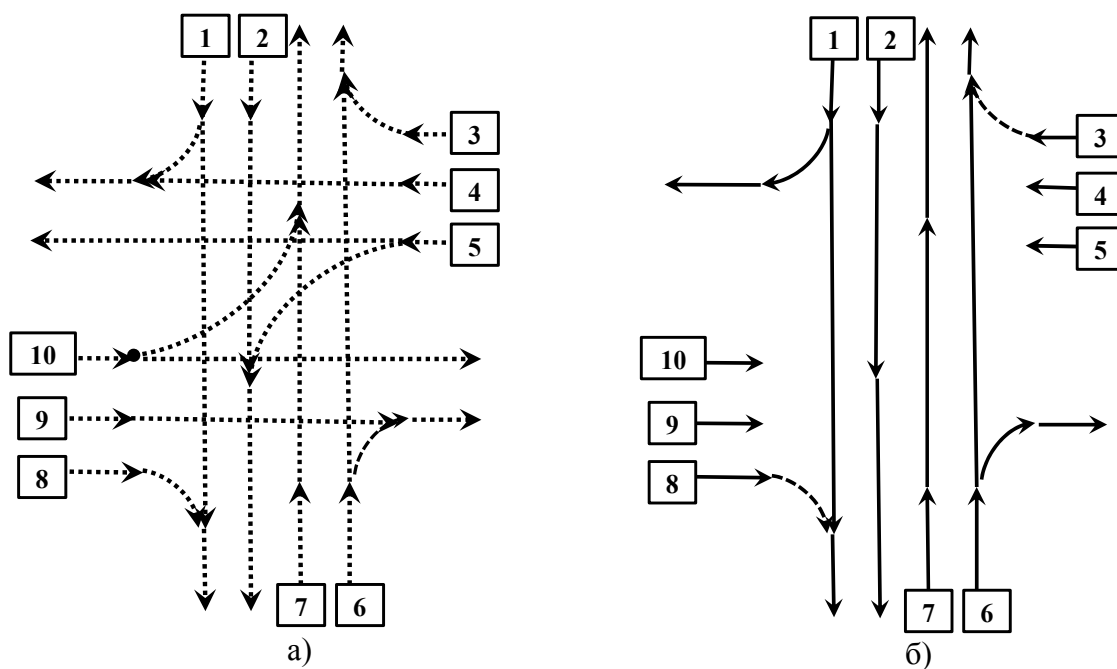
Свойство С1 ограничивает множество возможных схем пофазного разъезда. Еще более ограничивает множество возможных и приемлемых схем пофазного разъезда требование (свойство С2), чтобы для любой ( $k$ -й) фазы никакие пути из  $A_{FPk}$  не пересекались. В силу С2 пересечения путей из  $A_{PVj} \subseteq A_{FPk}$  не существует. Следовательно, в одну фазу могут быть включены такие  $A_{PVi}$  и  $A_{PVj}$ , что никакие пары путей, первый из  $A_{PVi}$ , а второй из  $A_{PVj}$ , не пересекались. Введем обозначение: если для пары  $A_{PVi}$  и  $A_{PVj}$  условие непересечения путей выполняется, то  $S_{ij} = 1$ , иначе  $S_{ij} = 0$ .

Если объединить два или более  $A_{PVi}$ , образуется подграф, который может иметь ОТ слияния. Развивая ранее введенное обозначение, положим  $S_{ij} = 2$ , если  $A_{PVi}$  и  $A_{PVj}$  не имеют общих вершин. Следовательно, вместе с  $A_{PVi}$  в  $A_{FPk}$  должно входить  $A_{PVj}$  для одной из входных вершин, для которой  $S_{ij} = 2$ , поскольку в этом случае потоки че-

рез  $A_{PVj}$  и  $A_{PVi}$  независимы и, следовательно, не создают помехи друг для друга. Это минимальное требование эффективности, повышающее уровень использования пропускной способности перекрестка.

Рис. 1 и 2 иллюстрируют сказанное на примере, построенном по типу пересечений московской Профсоюзной улицы с улицей Обручева и Нахимовским проспектом. Для системы трасс, показанных на рис. 1а, из условия эффективности вытекает, что в одну фазу нужно объединить наборы путей из вершин 1, 2, 6 и 7, поскольку они не содержат ОСП и ОСС и в то же время каждый из них пересекает пути из вершин 4, 5, 9 и 10 (которые, следовательно, должны быть разнесены по другим фазам). Пути из вершин 3 и (или) 8 могут быть включены в Фазу 1, но по условиям безопасности лучше этого не делать, т.к. при этом возникают ОТС. Так же пути из вершин 4 и 5 нужно объединить в фазу 2 (рис. 2а), а пути из вершин 9 и 10 — аналогичным образом в фазу 3. Так определенные наборы путей (для любого варианта Фазы 1) покрывают всё множество путей. Но в дополнение к ним можно ввести также Фазу 4 (рис. 2б), которая при определенных условиях может дать преимущество по пропускной способности.

Для сравнения альтернативных схем пофазного разъезда по критерию безопасности, исходя из количества ОТС и ОТСР, могут быть применены оценки, введенные в [2].



**Рис. 1.** Система трасс (а) и возможные схемы проезда на первой фазе светофорного цикла (б). Сплошной линией показаны обязательные пути, пунктиром – факультативные.

### 3. Задачи совместного структурного и параметрического управления потоком через перекресток

Выбор структуры СЦ и его параметров преследует следующие цели. Прежде всего, установить, возможно ли пропустить входящий поток по всем направлениям при какой-либо из допустимых СПР. При положительном ответе требуется найти СПР  $S$ , которая способна пропустить входящий поток и среди всех таких СПР максимизирует

показатель безопасности при надлежащем выборе вектора параметров  $R_S = (R_{1S}, \dots, R_{N(S)S})$  – продолжительностей фаз СЦ.

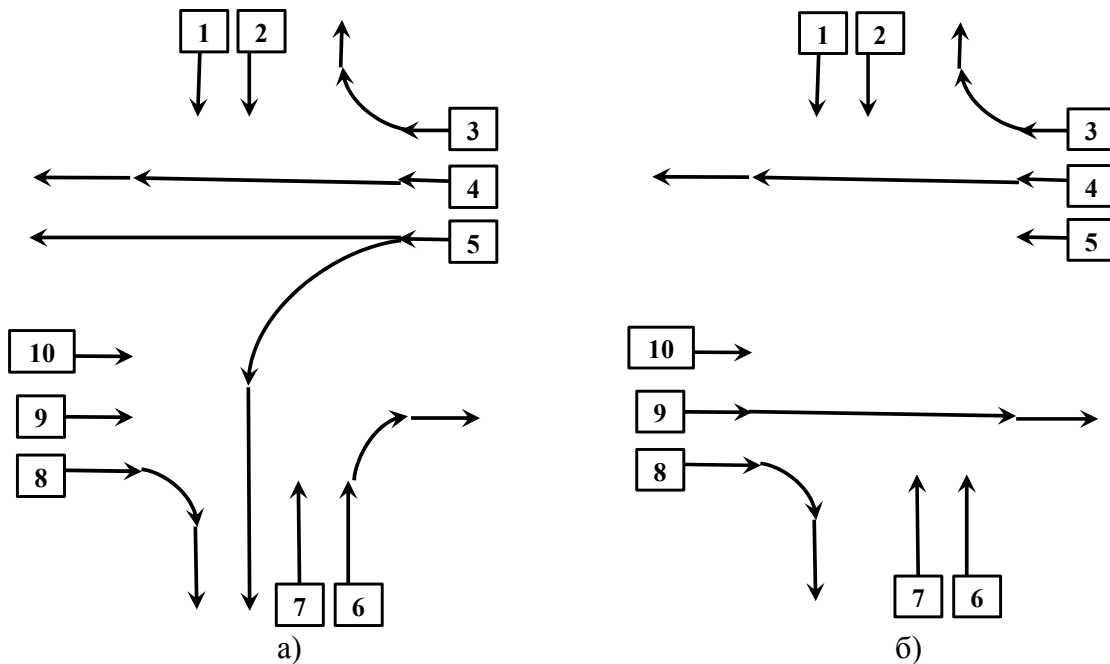


Рис. 2. Возможные схемы проезда на фазах светофорного цикла.

Структурная и параметрическая оптимизации светофорного регулирования на конкретном перекрестке реализуема при выполнении двух условий: У1 – пропускной способности каждой выходной дороги достаточно для прохождения совокупности всех ТС из всех входных потоков, которые переходят на данную дорогу для дальнейшего движения, и У2 – пропускной способности перекрестка достаточно для прохождения всех входящих ТС в нужных им направлениях. Иначе при любом локальном регулировании будет происходить накопление ТС, которое может привести к полной остановке движения на некоторых участках, и разрешение ситуации возможно только в масштабах всей ГДС. Если же оба условия выполнены (что и предполагаем далее), может быть поставлена задача о таком выборе СПР  $S$  и вектора ее параметров  $R_S$ , при которых: 1) обеспечивается прохождение всех входящих ТС в требуемых им направлениях без неограниченного роста очередей на входе и 2) среди всех таких пар  $(S, R_S)$  достигается наивысшее значение показателя безопасности. При решении такой задачи предполагаются известными осредненные показатели интенсивностей входных потоков на входах в перекресток  $(Q_v, v \in V_{IN})$  и пропорций (долей) их распределения по направлениям  $(K_{vw}, v \in V_{IN}, w \in V_{OUT}, \text{ где } \sum_{w \in V_{OUT}} K_{vw} = 1, v \in V_{IN})$ . Для дальнейшего удобнее иметь дело с совокупным входным потоком  $Q_{IN} = \sum_{v \in V_{IN}} Q_v$  и величинами  $C_{vw} = K_{vw} \frac{Q_v}{Q_{IN}}$ , выражающими доли потоков между парами входных и выходных вершин по отношению к  $Q_{IN}$ . Обозначив множество выходных вершин, относящих к дороге  $l$ ,  $W_l$  и ее пропускную способность  $Q_{TPl}$ , выразим условие У1 в форме

$$(1) \quad \sum_{w \in W_l} \sum_{v \in V_{IN}} C_{vw} \leq Q_{TP l} / Q_{IN}, \quad l=1, \dots, L.$$

Путем имитационного моделирования, выполняем для каждой фазы СПР  $S$  на модели ТП через регулируемый перекресток [3], аналогично [4-6], при заданных значениях  $C_{vw}$  – матрице  $C$  – устанавливается максимальная интенсивность совокупного входного потока  $Q_{IN kS}(C)$ , при которой в стационарном режиме перекресток обеспечивает прохождение всех входящих на  $k$ -й фазе потоков, т.е. пропускает между каждой парой вершин ( $v \in V_{IN kS}$ ,  $w \in V_{OUT}$ ) соответствующий поток  $C_{vw} Q_{IN kS}(C)$ . Отсюда вытекает, что целесообразно устанавливать долю времени для каждой фазы приблизительно равной  $R_{jks0} = Q_{IN jkS}^{-1}(C) \sum_{k=1}^{N(t)} Q_{IN kS}^{-1}(C)$  (с поправкой на ограниченную продолжительность СЦ). При этом максимальный входной поток составит

$$(2) \quad Q_{IN \max S}(C) = \left( \sum_{k=1}^{N(S)} Q_{IN kS}^{-1}(C) \right)^{-1}.$$

Следовательно, условие У2 приближенно выполняется, если для некоторой СПР  $Q_{IN \max S}(C) \leq Q_{IN}$ ; с учетом ограниченной продолжительности СЦ это неравенство должно быть выполнено с некоторым «запасом». Выбор наилучшей структуры с позиций безопасности должен выполняться среди таких СПР по критерию максимизации показателя безопасности, который, согласно концепции SSAM [7], может быть определен и вычислен по данным имитационного моделирования ТП.

## Список литературы

1. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. 69 с.
2. Вибрационные процессы, виброзащита в машиноведении: Отчет о НИР за 2017г. по теме 6-13 (промежуточный). Часть 2 / Перминов М.Д., Соловьёв В.О., Кельнер М.С., Соловьёв А.А., Валуев А.М., Величенко В.В., Воробьев Е.И., Гвритишвили П.П., Ковалев Н.С., Коровкин Ю.В., Минаев А.Я., Саяпин С.Н., Сергеев А.М., Скворчевский А.К., Статников И.Н. М.: Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, 2017. 105 с. Номер государственной регистрации: 01201355403.
3. Valuev A.M. Modeling of the Transport Flow Through Crossroads with Merging and Divergence Points // Proceedings of 2018 Eleventh International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Russia, Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, October 1-3, 2018. Ed. by Anatoly Tsvirkun. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551915>, P. 1-3.
4. Калинин И.Н., Глухарев К.К. Исследование интегральных характеристик перекрестков при помощи микроскопических моделей транспортных потоков // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 4. С. 523-534.
5. Вибрационные процессы, виброзащита в машиноведении: Отчет о НИР за 2015г. 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. Благоднарова РАН. 2015. 57 с. Номер государственной регистрации: 01201355403.
6. Валуев А.М., Соловьёв А.А. Моделирование зависимостей, характеризующих динамику автотранспортных потоков // Информатизация и связь. 2018. № 2. С. 106-113.
7. Gettman D., Head L. Surrogate safety measures from traffic simulation models // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2003. No. 1840. P. 104-115.