

# МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА РЕГУЛИРУЕМОГО ГОРОДСКОГО ПЕРЕКРЕСТКА С РАЗВЕТВЛЕНИЕМ ТРАСС

Соловьев А.А., Валуев А.М.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Россия, г. Москва, ул. Бардина, д. 4*

aa.solovjev@yandex.ru, valuev.online@gmail.com

*Аннотация: Управление перекрестком путем совместного выбора схемы пофазного разъезда и оптимизации светофорного регулирования при требуемой интенсивности транспортных потоков (ТП) по направлениям, включая разветвляющиеся трассы, рассматривается с учетом вероятностного характера ТП. Представлены постановки и способы решения задач оптимизации с использованием модели ТП на трассе.*

Ключевые слова: регулируемый перекресток, конфликтные точки, безопасность дорожного движения, схема пофазного разъезда, мониторинг, оптимизация, микроскопические модели транспортных потоков, вычислительные эксперименты.

## Введение

Перекрестки в городской дорожной сети — важнейший ее элемент, который, собственно, и обеспечивает водителям транспортных средств (ТС) возможность выбирать из большого количества маршрутов. На уровне отдельного перекрестка это разнообразие возможных маршрутов поддерживается тем, что для всех или большинства въездных дорог организация дорожного движения (ОДД) допускает дальнейшее движение более чем по одной выездной дороге.

ОДД регламентирует, однако, движение не только по дорогам в целом, но и по отдельным полосам дорог. При этом, особенно при малом количестве полос на въездной дороге (одна или две), некоторые из требуемых переходов с входных дорог на выходные требуют разветвления соответствующих входных полос. Прохождение транспортным средством точки разветвления означает выбор между двумя исходящими полосами, каждая из которых переходит в полосу определенной выходной дороги. Но наличие ветвящихся полос часто встречается и на перекрестках многополосных дорог, поскольку оно обеспечивает большую гибкость в адаптации как транспортного потока, так и системы управления движением к изменяющимся пропорциям, в которых входной поток делится между выходными.

Синтез регулируемого перекрестка как объекта, управление которым адаптируется к количественным характеристикам потоков через него (их интенсивностям и пропорциям их разделения между направлениями) включает структурный и параметрический уровень. Как и в ранее опубликованных работах авторов [1, 2], первый из них состоит в разделении разрешенных трасс прохождения перекрестка между фазами светофорного цикла (СЦ), иначе говоря, в определении *схемы пофазного разъезда* (СПР) [3]. Параметрический уровень заключается в определении длительностей фаз светофорного цикла при заданной СПР, их последовательности в СЦ и может также включать сдвиги начала фазы для отдельных трасс.

Следует отметить, что ранее предпринимались отдельные попытки связать микроуровневое моделирование транспортных потоков на перекрестке со случайным характером входящих потоков с выбором продолжительности фаз светофорных циклов. В этом отношении можно рассмотреть в совокупности две работы, описывающие «проекции» такого подхода в область моделирования ТП в рамках теории массового обслуживания [4] и с помощью модели следования за лидером [5] М. Трайбера (IDM) [6]. Однако такой подход, позволяя в частных случаях дать определенные рекомендации по регулированию ТП, не имеет целостного характера и упрощенно представляет как проезд перекрестка, так и стохастическую природу состава входящих транспортных потоков. Другие работы в данном направлении [7] рассматривают еще более частные случаи данной проблемы. В работе [8] предлагается вариант данного подхода с дискретным представлением динамики ТП на микроуровне, еще более схематизирующий проезд перекрестка и затрудняющий воспроизведение его структуры и геометрии, в результате чего вырабатываемые рекомендации носят лишь предварительный характер. В частности, при данном подходе едва ли возможен целенаправленный выбор наиболее эффективной СПР. Другой вариант использования дискретизированного представления ТП на перекрестке для целей выбора параметров СЦ предлагается в работе [9].

В настоящей работе представлено дальнейшее развитие выдвинутого ранее подхода к задаче оптимального синтеза регулируемого перекрестка [1, 2, 10], на основе учета стохастического характера трафика для широко распространенного случая наличия ветвящихся трасс.

## 1 Определение рекомендуемых безопасных схем пофазного разъезда на перекрестке с разветвлением трасс

Структура перекрестка (рис. 1, 2) определяется набором разрешенных трасс его проезда, под которыми мы понимаем осевые линии дорожных полос, и их взаимным расположением. Общие точки двух трасс с позиций безопасности движения именуется *конфликтными точками*, а в отношении траекторий транспортных средств они являются *особыми точками (ОТ)*. Различаются ОТ разделения (ветвления), слияния и пересечения трасс, обозначаемые соответственно ОТР, ОТС, ОТП.

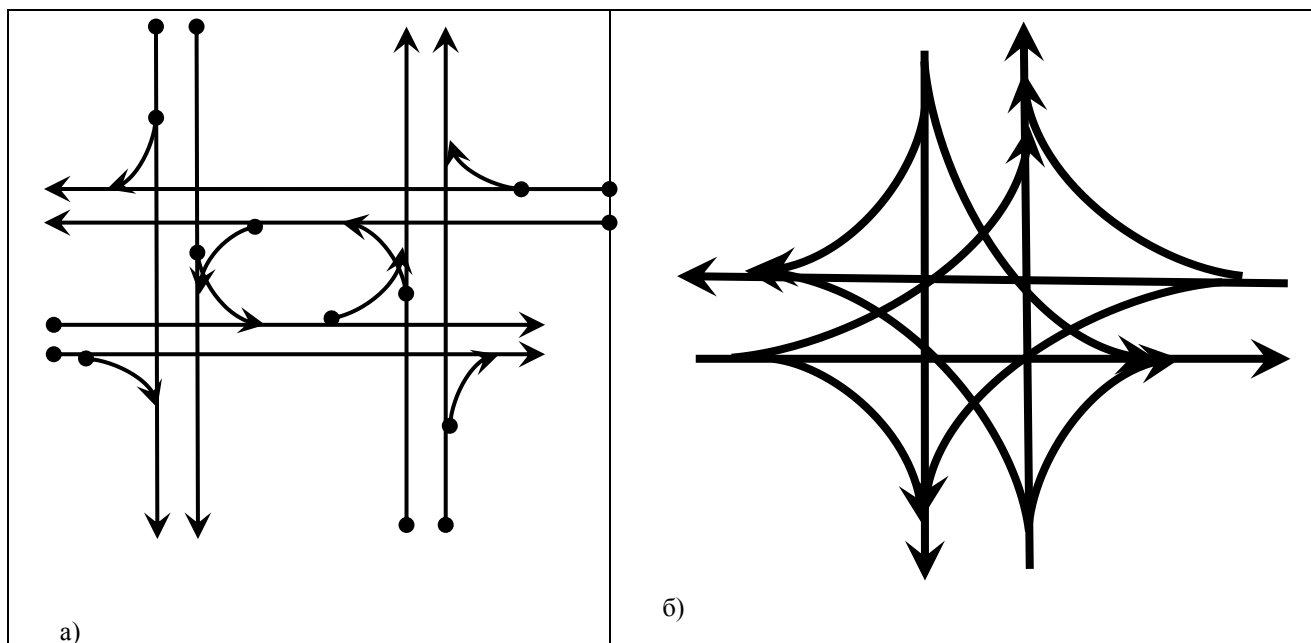


Рис. 1. Структуры перекрестков: а) типовая структура перекрестка двухполосных дорог согласно В.Г. Живоглядову [11, рис. 5.22]; б) Структура перекрестка 1-й Квессинской и Вятской улицы

Разделение трасс между фазами СЦ может исключить прохождение по нескольким направлениям отдельных ОТП и ОТС на некоторых (или всех) фазах СЦ; для ОТР это невозможно. ОТ, которая проходит на фазе только по одному направлению, называется *неактивной* (в качестве особой точки) на этой фазе. Допускаются, за редкими исключениями, только СПР, в которых все ОТП неактивны на всех фазах СЦ; в этом состоят минимальные требования к безопасности СПР и такие СПР рассматриваются как *условно бесконфликтные*. Активные ОТП могут допускаться только при весьма малых интенсивностях потоков в некоторых направлениях, при которых конкуренция за порядок прохождения таких ОТП незначительна; этот случай рассматриваться не будет.

Слияние потоков в ОТП на определенной фазе означает конкуренцию транспортных средств, подъезжающих к ней по разным трассам, за ее прохождение, что является источником потенциальных конфликтов. СПР рассматривается как *абсолютно бесконфликтная*, если все ОТП и ОТС неактивны на всех фазах. Для условно бесконфликтных СПР вводятся показатели конфликтности — максимальное количество активных ОТС на одной фазе и совокупное количество активных ОТС на всех фазах. Ставится задача поиска всех условно бесконфликтных СПР с ограничением на уровень конфликтности. Общий подход к ее решению был предложен в работе [2].

Уточним представление структуры и геометрии регулируемого перекрестка. Каждая допустимая трасса его проезда начинается в точке на входной стоп-линии, (такие точки называем далее входами перекрестка) и заканчивается в условно определяемой точке выхода, расположенной после всех ОТ на трассе. Между двумя трассами имеется потенциальный конфликт уровня 2, если они сливаются и уровня 3, если они пересекаются; в противном случае уровень конфликтности равен 0. Организация дорожного движения предполагает, что на каждой фазе для определенного входа перекрестка проезд либо разрешен по всем трассам, начинающимся в нем, либо запрещен по всем. Иными словами, для каждого входа на определенной фазе СПР разрешает либо проезд по всем трассам, начинающимся в этом входе, либо ни по одной из них; тем самым, СПР определяется разделением между фазами всех входов. При этом каждый вход должен быть включен в СПР хотя бы на одной фазе и может быть включен в СПР на нескольких фазах.

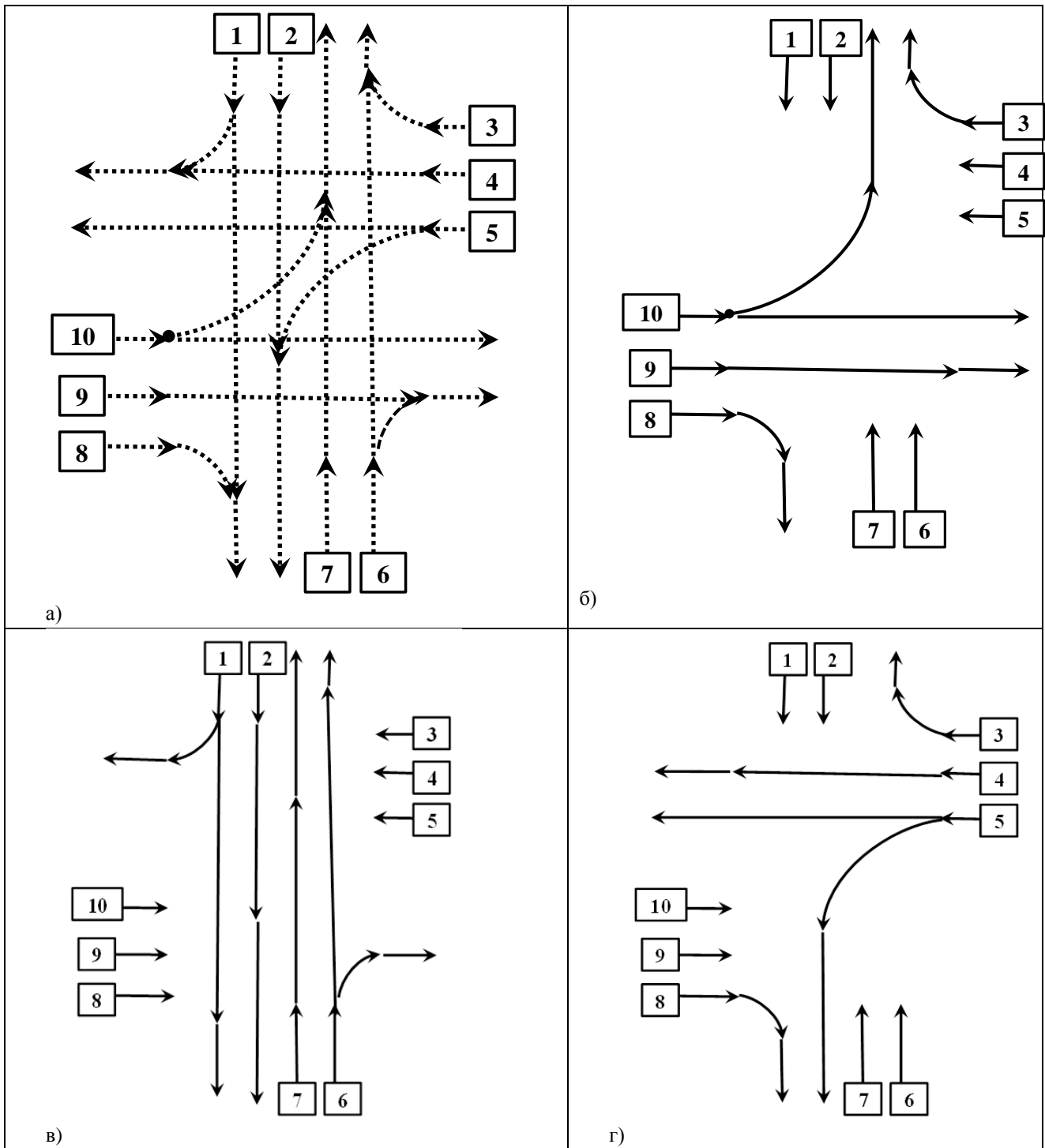


Рис. 2. Структуры перекрестка по типу пересечений Профсоюзной улицы: а) система трасс; б), в), г) схемы проездов на отдельных фазах для одной из трехфазных абсолютно бесконфликтных СПР

Таким образом, для решения вопроса о допустимости и целесообразности включения в СПР на одной фазе пары входов должен быть рассмотрен максимальный уровень конфликтности между всевозможными парами трасс, начинающихся соответственно в первом и втором входе. Если он не превышает 2, в качестве критерия целесообразности объединения входов в одну фазу рассматривается совокупный уровень конфликтности в парах трасс. Специфической чертой алгоритма выявления СПР с приемлемым уровнем конфликтности для перекрестков с разветвлением трасс является необходимость учета наличия для некоторых входов более чем одной трассы, исходящей из них.

Для отбора рациональных безопасных СПР накладываются еще два условия. Первое — это ограничение количества фаз СПР. Если на каждой фазе пропускать ТП только от одного входа, такая

СПР будет наиболее безопасной, но нерациональной, т.к. при этом использование перекрестка будет совершенно неэффективным, не позволяющим обеспечить пропуск ТП с высокой и даже средней интенсивностью. На практике, как правило, количество фаз не превышает трех и в отдельных случаях четырех; это условие и вводится в качестве ограничения. Другое ограничение состоит в поиске лишь *нерасширяемых* СПР, т.е. таких, для которых добавление на какой-либо фазе дополнительной трассы приводит к нарушению ограничения на уровень конфликтности. Для нерасширяемой СПР исключение отдельных трасс на отдельных фазах может не нарушать требования прохождения всех трасс за СЦ, но, очевидно, понижает эффективность, а в ряде случаев — и надежность СПР.

## 2 Параметрическая и комбинированная оптимизация перекрестка с разветвлением трасс при известной интенсивности и структуре транспортного потока через него

Построение множества безопасных схем пофазного разъезда приводит — особенно при жестких ограничениях на уровень конфликтности — к отбору немногих, а нередко и единственной рекомендуемой СПР. В последнем случае управление перекрестком принципиально может быть лишь параметрическим, заключааясь, прежде всего, в выборе продолжительности фаз СЦ; дополнительные возможности параметрического управления, состоящие в том, что некоторая фаза для отдельных трасс может быть сдвинута во времени относительно начала СЦ, рассматриваются в следующем разделе. Если же рекомендуемых СПР больше одной, то принципиально возможно один-два раза в сутки менять и используемую СПР, что означает структурное управление перекрестком. Оптимизация управления перекрестком в течение характерных периодов (часов дня) и на структурном, и на параметрическом уровне исходит из знания о текущей интенсивности и структуре транспортного потока через него в течение такого периода и адаптируется к ним. Основной решаемой задачей является задача оптимизации светофорного цикла для заданной СПР при известной интенсивности входящих потоков для каждого входа и известных пропорциях их разделения между трассами в точках ветвления. Предлагаемый критерий оптимальности в ней позволяет сопоставлять результаты оптимизации для разных рекомендуемых СПР (при их наличии) и тем самым выбирать наиболее эффективную из них.

Основная идея параметрической оптимизации светофорного цикла заключается в следующем. Задается его продолжительность  $T_{TLC}$ ; при необходимости рассматриваются варианты для значения  $T_{TLC}$ . Продолжительности фаз выбираются таким образом, чтобы время, минимально необходимое в среднем для пропуска по каждой трассе количества ТС, поступающих на вход трассы за время  $T_{TLC}$ , не превышало совокупной длительности фаз, на которых предусматривается проезд по трассе. При этом для ветвящихся трасс требуемое время определяется с учетом того, что поток по трассе делится в точке ветвления между ветвями случайным образом в известной пропорции.

Следует заметить, что разброс количества ТС, проходящих по трассе за определенное время, весьма значителен даже при отсутствии на ней точек ветвления (табл. 1), а тем более при их наличии. Этот разброс имеет особое значение в отношении взаимовлияния ТП на трассах, проходимых на последовательных фазах, что рассматривается в следующем разделе.

Таблица 1. Пример данных наблюдения прохождения ТП по трассе в течение нескольких циклов

Номер цикла	Количество ТС, пересекших СЛ за временные интервалы			
	0–10 сек	10–20 сек	20–30 сек	0–30 сек
1	5	5	4	14
2	3	4	3	10
3	3	5	3	11
4	3	5	4	12
5	4	4	4	12

Раскроем способ расчета требуемых показателей для случая разветвляющейся трассы, который показывает также и способ расчета для более простого случая трассы без разветвлений. Предполагаем, что стоячая очередь ТС на входе трассы в начале зеленой фазы достаточно велика и полностью не приходит в движение за одну фазу. При известной доле  $q$  в потоке первого из двух возможных направлений определяется для заданной продолжительности зеленой фазы  $T$  вероятность того, что по первому направлению пройдет  $N_1$ , а по второй  $N_2$  ТС; эту вероятность обозначим  $p_2(N_1, N_2 | T, q)$ . Если в потоке наблюдается данная пропорция разделения ТС между

направлениями, то, многократно наблюдая за прохождением ТС по трассе в течение интервалов времени  $T_0$ , и фиксируя моменты прохождения ТСЛ первым, вторым и т.д. ТС, начинающим движение по первому направлению  $(t_{11}, t_{12}, \dots)$  и по второму направлению  $(t_{21}, t_{22}, \dots)$ , получаем для времени  $T \leq T_0$  статистическую оценку  $p_2(N_1, N_2 | T, q)$  в виде частного от деления среднего количества наблюдений (интервалов времени), когда

$$t_{1N_1} \leq T, t_{1N_1+1} > T, t_{1N_2} \leq T, t_{1N_2+1} > T, \quad (1)$$

на полное количество наблюдений. Таким же образом ведется расчет, когда последовательности  $(t_{11}, t_{12}, \dots)$  и  $(t_{21}, t_{22}, \dots)$  получаются путем имитационного моделирования на модели с верифицированными параметрами; но в этом случае, в отличие от натуральных наблюдений, в котором  $T_0$  ограничено фактически использовавшимися продолжительностями фаз, такого ограничения нет. Для случая трассы без разветвлений используются только последовательности  $(t_{11}, t_{12}, \dots)$  и определяются соответствующие величины  $p_1(N_1 | T)$ . Величины  $p_1(N_1 | T)$  и  $p_2(N_1, N_2 | T, q)$  используются ниже, а среднее время для пропуска  $N$  ТС определяется на основе тех же данных соответственно как среднее значение  $t_{1N}$  в исходной последовательности  $(t_{11}, t_{12}, \dots)$  и  $t_{0N}$  в последовательности  $(t_{01}, t_{02}, \dots)$ , в которой члены последовательностей  $(t_{11}, t_{12}, \dots)$  и  $(t_{21}, t_{22}, \dots)$  объединены и упорядочены по возрастанию.

Итак, свяжем полученные величины минимального необходимого времени проезда требуемого количества ТС по трассе с номером  $j$ , обозначая соответственно количество трасс  $J$ , ТС  $N_{Rj}$ , а требуемое время  $T_{\min j}(N_{Rj})$ . Пусть имеется  $m$  фаз с продолжительностями  $T_{P1}, \dots, T_{Pm}$ , в сумме составляющих заданную длительность цикла  $T_{TLC}$ , причем проезд  $j$ -й трассы предусмотрен на множестве фаз  $M_j \subseteq \{1, \dots, m\}$ . Пусть входящий поток в единицу времени для  $j$ -й трассы равен  $Q_{Rj}$  и, следовательно,  $N_{Rj} = Q_{Rj} T_{TLC}$ . Тогда оптимальные продолжительности фаз определяются из задачи линейного программирования

$$s \rightarrow \max, T_{P1} + \dots + T_{Pm} = T_{TLC}, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in M_j} T_{Pk} \geq T_{\min j}(N_{Rj})(1 + s), j = 1, \dots, J. \quad (3)$$

Задача разрешима, если ее решение дает  $s \geq 0$ , причем величина  $s$  показывает минимальный относительный временной резерв для проезда входящих транспортных потоков по всем направлениям. Значение  $s$  может служить также критерием для выбора СПР: из всех предпочтительных в качестве наиболее эффективного (надежного).

### 3 Коррекция предварительно оптимизированных продолжительностей фаз и комбинированная оптимизация перекрестка с разветвлением трасс

Если ОТП или ОТС отсутствуют на трассе или, в силу геометрии перекрестка и используемой СПР, заведомо проходятся независимо последовательностями (кластерами) из транспортных средств, проезжающими трассу на одной фазе, для всех трасс, пересекающихся (соединяющимися) в этой ОТ, — тогда вероятностное распределение количества ТС, проходящих по трассе за фазу, не имеет значения для обеспечения полного пропуска входящих потоков по ней. Значение имеет только их среднее количество за фазу, что и было положено в основу параметрической оптимизации СЦ, описанной выше. Случайное разделение входящих ТС между направлениями при стабильности их средних долей также не изменяет ситуации.

В других случаях на трассе имеются ОТП или ОТС, которые активизируются на короткий срок в начале фазы, когда завершающие ТС с предыдущей фазы еще не прошли такую ОТ, а головное ТС кластера на трассе для текущей фазы уже достигло ее. Случайные отклонения в прохождении цепочек потоков по трассе за фазу, их разделения между направлениями в пределах стартового кластера, в силу чего моменты освобождения ОТ предыдущим кластером и захвата новым кластером являются случайными величинами, приводят на некоторых фазах к задержкам случайного характера в движении всех ТС нового кластера, включая те автомобили, которые еще не пересекли входную стоп-линию и могут не успеть ее пересечь. Эти задержки могут уменьшить количество ТС, прошедших на таких фазах, и, как следствие, приводят к уменьшению средней интенсивности потока

по трассе. На возникновение таких задержек и их величины влияет расположение ОТ относительно границ трасс, проходимых на последовательных фазах, а значит, и последовательность фаз в светофорном цикле (рис. 3).

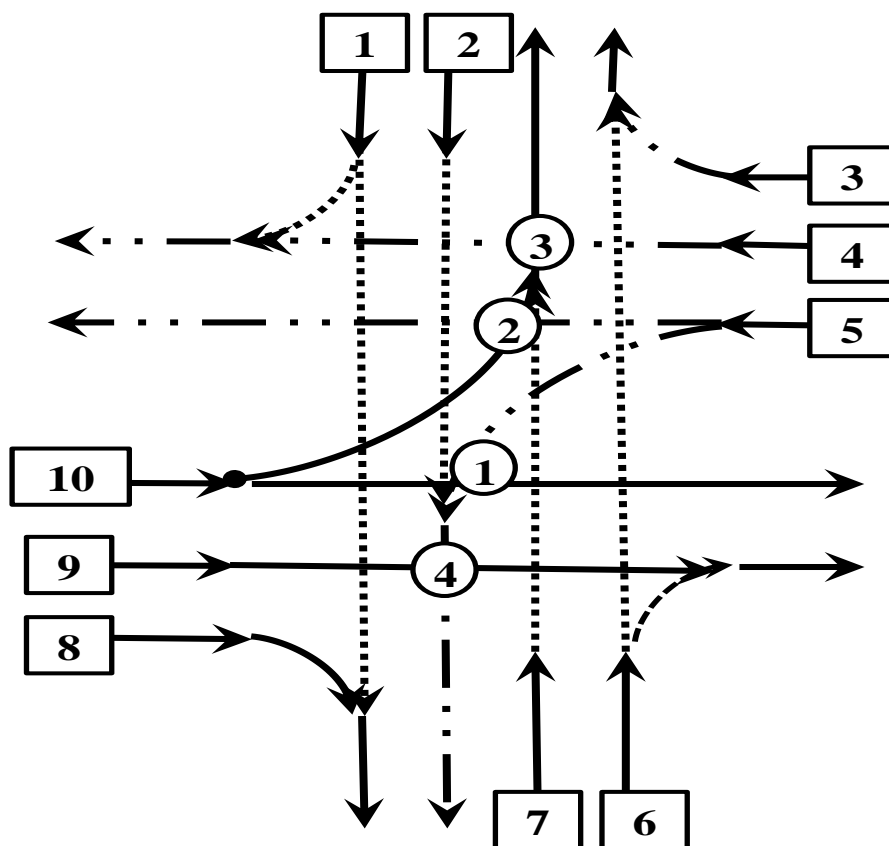


Рис. 3. Временно активизируемые ОТП на границе 3-й и 1-й фазы СПР, показанной на рис. 2

Случайно-неравномерное поступление ТС на входы трассы, колеблющееся от одного цикла к другому, а особенно его циклический характер в случае регулирования на входных дорогах, также вызывает колебания числа ТС в кластере на трассах с малоинтенсивным движением, при котором очереди на некоторых циклах полностью рассасываются за зеленую фазу, а на других сохраняются до конца фазы. Такие колебания существенны как источник колебания моментов освобождения ОТ (отсчитываемых от начальных моментов светофорных циклов) на таких трассах, последствия чего описаны выше.

Оптимизация продолжительности фаз без учета упомянутых задержек (в общем, имеющих второстепенное значение, кроме случая максимально возможной по пропускной способности перекрестка интенсивности ТП) как раз и позволяет определить временные резервы, которые могут быть использованы для компенсации их негативного влияния на проезд входящих потоков через перекресток; эти резервы времени при продолжительностях светофорных фаз, полученных из решения задачи (2)–(3), равны

$$\sum_{k \in M_j} T_{Pk} - T_{\min j}(N_{Rj}), j = 1, \dots, J. \quad (4)$$

Из сказанного вытекает, что расчет продолжительностей фаз, обеспечивающих в упрощенных предположениях прохождение потоков в среднем с минимизацией резервов времени для каждой фазы является предварительным и может требовать, с учетом вышеописанных задержек, выбора наиболее эффективной последовательности фаз СПР в цикле и либо коррекции самих продолжительностей, либо небольшого временного сдвига фаз на отдельных трассах. При этом возникают две взаимосвязанные задачи: выбор наиболее эффективной последовательности фаз и коррекция продолжительностей фаз и (или) назначение сдвигов фаз для отдельных трасс.

В детерминированном варианте учет влияния задержек на ОТП и ОТС было рассмотрено в работе [10]. Принципиально вероятностный подход состоит в том же, но должен значительно более адекватно оценить их.

Рассмотрим определение вероятностных характеристик задержек на ОТП и ОТС и их влияния на пропуск ТС по трассам. Пусть последовательность фаз задана и сдвига временных границ фаз для любой трассы нет. Начнем с наиболее распространенного случая. Пусть две трассы, проходимые на последовательных фазах 1 и 2, связаны наличие общей ОТП или ОТС. Для первой трассы, не предполагая никакой задержки в начале ее зеленой фазы, на основе наблюдения или моделирования прохождения ТС по ней при известной продолжительности фазы  $T_{P1}$  имеем две вероятностные характеристики — ранее рассмотренные вероятности длины  $N_1$  кластера на одной фазе  $p(N_1 | T_{P1})$  или и распределение времени освобождения упомянутого ОТ замыкающим ТС в первом кластере —  $F_{11}(T_{11} | T_{P1})$ ; это время отсчитывается от начала зеленой фазы для трассы. Для определения последних используются временные последовательности, подобные движению ранее рассмотренным  $(t_{11}, t_{12}, \dots)$  или  $(t_{21}, t_{22}, \dots)$ , но относящиеся к моментам освобождения ОТ, а не пересечения входной СЛ. В свою очередь, для времени захвата упомянутого ОТ первым ТС во втором кластере также должно быть получено вероятностное распределение  $F(T_{20})$  момента  $T_{20}$  захвата ОТ первым ТС в кластере.

Величина задержки равна  $\max\{T_{20} + T_1 - T_{11}, 0\}$ ; на основе перечисленных вероятностных характеристик определяется ее математическое ожидание по формуле

$$\Delta T_{20}(T_1) = \int_{T_{20 \min}}^{T_{20 \max}} \int_{T_{11 \min}}^{T_{11 \max}} \max\{T_{20} - T_{11}, 0\} dF_{11}(T_{11} | T_{P1}) dF_{20}(T_{20}). \quad (5)$$

В случае проезда временно активированной ОТП формула (5) с малой погрешностью определяет потерю эффективного времени зеленой фазы для второй трассы. Оценка задержки по формуле (5) несколько завышает ее, поскольку пришедшая в движение и притормозившая на  $\Delta T_{20}$  очередь ТС в момент возобновления движения ее головного ТС оказывается плотнее, чем была бы к тому же моменту очередь, стартовавшая на  $\Delta T_{20}$  позже; следовательно, в первом случае она включает больше ТС, пересекших входную СЛ. При наличии условных временных резервов для обеих трасс, рассчитанных по формуле (4), коррекция продолжительности обеих фаз должна удовлетворять условиям:

$$T_{P1CORR} \geq T_{\min 1}(N_{R1}); \quad (6)$$

$$T_{P2CORR} - \Delta T_{20}(T_{P1CORR}) \geq T_{\min 2}(N_{R2}). \quad (7)$$

Если условия типа (6) и (7) могут быть удовлетворены для всех подобных пар трасс без изменения общей продолжительности светофорного цикла и других ситуаций нет, на основе их может быть поставлена задача коррекции оптимальной продолжительности фаз типа задачи (2)–(3), в которой вместо  $T_{Pk}$  используются  $T_{PkCORR}$ , а в условиях (3) для «вторых» трасс левые части заменяются на левые части формул типа (7).

В общем случае нужно допустить задержку головного ТС кластера на каждой трассе в начале зеленой фазы для его трассы, тем более что по формуле (5) задержка может быть нулевой. Заодно допустим, что зеленая фаза для  $j$ -й трассы сдвинута относительно «нормального» начала на величину  $D_j$ , которая может быть как положительной, так и отрицательной. В этом случае задержки для всех трасс при заданных величинах  $D_j$ ,  $T_{PkCORR}$  определяются из системы уравнений вида

$$\Delta T_{20} = \int_{T_{20 \min}}^{T_{20 \max}} \int_{T_{11 \min}}^{T_{11 \max}} \max\{T_{20} + D_2 - (T_{11} + D_1), 0\} dF_{11}(T_{11} | T_{P1CORR} - \Delta T_{10}) dF_{20}(T_{20}), \quad (8)$$

учитывающих как временной сдвиг фаз для первой и второй трассы, так и задержку для первой трассы, приводящую к сокращению эффективной продолжительности зеленой фазы для нее. В этом случае решается задача совместной оптимизации  $T_{PkCORR}$ ,  $k = 1, \dots, m$ , и  $D_j$ ,  $j = 1, \dots, J$ , по тому же критерию при ограничениях типа (7) и системе равенств типа (8) для определения средних задержек для всех трасс. Эта задача является нелинейной и содержит сравнительно сложные по форме соотношения (8), но в силу ее небольшой размерности (количество фаз СЦ плюс удвоенное количество трасс) не представляет существенной трудности для ее решения итерационными

методами. Следует подчеркнуть, что здесь не требуется получения высокой точности решения поставленной задачи, поскольку в силу случайного характера транспортного процесса, детерминированной и случайной динамики входящих потоков, проявляющейся даже на временных интервалах порядка одного двух часов (что соответствует нескольким десяткам светофорных циклов) практически получаемый результат всё равно будет заметно отличаться от их математических ожиданий.

В качестве альтернативы конструированию комбинированных численных методов для решения сформулированных задач, кроме простейшей (но наиболее важной) задачи (2)–(3), коррекция предварительно оптимизированных согласно (2)–(3) продолжительностей фаз может приближенно выполняться путем многократного имитационного моделирования транспортного процесса в течение нескольких десятков СЦ. При этом оцениваются средние величины задержек для всех трасс, выявляются те, которые ведут к росту очередей на входах отдельных трасс, и соответственно перераспределяются продолжительности фаз в пользу тех, недостаточная продолжительность которых ведет к такому росту. Кроме того, сопоставляется влияние более позднего начала зеленой фазы на отдельных трассах на увеличение задержки для предшествующей трассы (или практическое отсутствие такого увеличения) и уменьшение задержки для самой трассы и при наличии общего положительного эффекта приближенно определяются наиболее эффективные значения таких временные сдвигов.

Тестовые расчеты показывают, что учет фактически наблюдаемого разброса характеристик динамики ТС при прохождении ими перекрестков и случайного характера разделения потока в точках ветвления позволяет более реалистично оценить влияние определенных значений параметров светофорного регулирования на прохождение потока. Тем самым можно ожидать, что предлагаемый способ расчета оптимальных значений параметров светофорного регулирования совместно с определением его качественных характеристик на основе вероятностного представления ТП позволит обеспечить более эффективное использование локальных ресурсов дорожной сети и расширить область возможных значений интенсивностей ТП по разным направлениям, позволяющих с приемлемой вероятностью обеспечить их пропуск через перекресток.

## **Заключение**

Транспортные потоки в городской дорожной сети — сложное, до конца не изученное явление, включающие технические (характеристики автомашин и дорог), социальные (общественный спрос на передвижения) и даже индивидуально-психологические (психологические различия, влияющие на стиль вождения) аспекты. В определенных условиях — на протяженных магистралях без пересечений — индивидуальные различия между транспортными единицами в известной степени нивелируются в интенсивном потоке.

Проезд регулируемых перекрестков совершенно отличен от случая такой магистрали — вместо длинных последовательностей ТС, едущих в одном направлении по прямым или слабо искривленным дорогам, транспортные потоки разбиваются на короткие цепочки, частично движущиеся по кривым дорогам, из-за чего ограничения на безопасную скорость могут меняться вдоль некоторых трасс. Направление движения может изменяться на самом перекрестке, после проезда точки разветвления разрешенных трасс. Последняя особенность, чрезвычайно характерная для устройства городских перекрестков, является предметом рассмотрения в настоящей работе под углом зрения ее учета при управлении движением на перекрестке.

Случайные значения статических и динамических характеристик транспортных единиц, рассматриваемых безлично как частицы транспортного потока на отдельных трассах, ведет, в силу массового характера дорожного движения, к возможности использовать для него различные вероятностные представления. Для того чтобы такое представление можно было бы конструктивно использовать в целях эффективного управления дорожным движением, оно должно отражать связь характеристик транспортного потока как случайного процесса как с параметрами управления, так и с составом входящих потоков, рассматриваемых в том числе и в отношении распределение в них ТЕ с различными требованиями к направлению движения после проезда перекрестка. В работе предложено такого рода представление, конкретные параметры которого могут быть определены как в результате обработки данных мониторинга (если ранее наблюдались потоки с подобными свойствами), так и, в более широком контексте, с помощью массовых вычислительных экспериментов.



Предложенное в работе вероятностное описание дорожного движения на регулируемом перекрестке, содержащем разветвляющиеся трассы, при применении схем пофазного разъезда без активных точек слияния и пересечения трасс позволило развить ранее предложенные способы комплексной оптимизации дорожного движения на перекрестке без изменения его структуры, названной авторами *синтезом регулируемого перекрестка*. Общая задача такого синтеза разбивается на взаимосвязанные подзадачи предварительной оптимизации продолжительности фаз при заданной СПР и выбора наиболее эффективной из рекомендуемых безопасных СПР. Эта предварительная оптимизация не учитывает возможное непродолжительное взаимодействие кластеров на трассах, проезжаемых на последовательных фазах и имеющих общую ОТП или ОТП, выражаемое задержкой в движении второго кластера до освобождения такого ОТ первым кластером. Следующие подзадачи состоят в коррекции продолжительности фаз и (или) определении для некоторых трасс временных сдвигов начальных моментов зеленых фаз (отсчитываемых от начала светофорного цикла), а также последовательности фаз, т.е. отнесенных к ни схем проезда, составляющих текущую СПР. Выполненные вычислительные эксперименты дают основание ожидать, что предложенная методика оптимизации управления дорожным движением на перекрестке обеспечит более высокую его эффективность.

## Литература

1. 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.
2. *Валуев А.М., Соловьёв А.А.* Задачи синтеза регулируемых перекрестков городских магистралей и методы их решения // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019): труды Двенадцатой международной конференции, 1–3 окт. 2019 г., Москва / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук. — М.: ИПУ РАН, 2019. — С. 598–605.
3. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. — 69 с.
4. *Babicheva T.S.* The use of queuing theory at research and optimization of traffic on the signal-controlled road intersections // *Procedia Computer Science*. Vol. 55. 2015. — P. 469–478.
5. *Babicheva T. S., Babichev D.S.* Numerical methods for modeling of traffic flows at research and optimization of traffic on the signal-controlled road intersections // *Procedia Computer Science*. — 2015. — Т. 55. — С. 461–468.
6. *Treiber M., Kesting A.* Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. — Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. — xiii+504 p.
7. *Kamran M.A., Ramezani H., Masoumzadeh S., Nikkhoo F.* Traffic light signal timing using simulation // *Communications on Advanced Computational Science with Applications*. — Vol. 1, 2017. № 1. — P. 1–11.
8. *Danilevičius A., Bogdevičius M.* Investigation of traffic light switching period affect for traffic flow dynamic processes using discrete model of traffic flow // *Procedia Engineering*. Vol. 187, 2017. — P. 198–205.
9. *Derai S., Ghoul R.H.* Control isolated intersections with hybrid petri nets and hybrid automaton // *EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica*. Vol. 65, 2017. № 3. — P. 112–116.
10. *Соловьёв А.А., Валуев А.М.* Проблема оптимизации управления перекрестком с многостадийным прохождением транспортных потоков // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2020): труды Тринадцатой междунар. конф., 28-30 сентября 2020 г., Москва / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна; М.: ИПУ. — С. 1107–1116.
11. *Живоглядов В.Г.* Теория движения транспортных и пешеходных потоков. Ростов н/Д: Известия вузов Сев.-Кавк. региона, 2005. — 1082 с.