

АЛЬТЕРНАТИВЫ В РЕГУЛИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПЕРЕКРЁСТКЕ И ПОДХОДЫ К ИХ ВЫБОРУ

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: Метод управления перекрестком путем совместного выбора схемы пофазного разъезда и оптимизации светофорного регулирования при требуемой интенсивности транспортных потоков по направлениям движения развивается с учетом взаимодействия кластеров на выходных дорогах. Оптимизируется последовательность фазовых схем проезда и временные сдвиги фаз для отдельных трасс.

Ключевые слова: регулируемый перекресток, конфликтные точки, безопасность дорожного движения, схема пофазного разъезда, мониторинг, оптимизация.

Введение

Транспортные проблемы больших городов, несмотря на значительные вложения в их решение, в особенности связанные со строительством и реконструкцией дорог и дорожных сооружений, не имеют значительной тенденции к их облегчению. Дальнейшее усиление и вложение средств в этом направлении сталкивается с ограниченностью не только финансовых, но и пространственных ресурсов и падением эффективности вложений, если они не подкрепляются усовершенствованием организации дорожного движения и управления им. Развитие общественного транспорта, будучи само по себе рациональным направлением развития транспортной системы, не может отменить потребности в использовании индивидуального транспорта не только для пассажирских поездок, но и для перевозок, в том числе направленных на обслуживание индивидуальных заказов; более того, условия для индивидуального транспорта усложняются при перераспределении ресурсов дорожной сети в пользу общественного транспорта.

Успешное развитие современных инфокоммуникационных технологий имеет большое значение и для городского дорожного движения и эффективно используется, в частности, для контроля за соблюдением правил дорожного движения на магистралях. Вместе с тем эти возможности еще недостаточно используются для эффективной организации и управления дорожным движением, которое может и должно составлять единое целое. Задачи управления дорожным движением с применением современных возможностей фиксации текущей дорожной обстановки и тенденций ее изменения, а также накопленных исторических данных, требуют нового осмысления, формализации и разработки методов их решения.

Основным объектом приложения средств управления дорожным движением являются регулируемые перекрестки, но они же и являются не только важнейшими, но и наиболее проблематичными элементами городской дорожной сети (ГДС) с точки зрения проявления в них динамики транспортных потоков и факторов неопределенностей. Кроме того, структуры перекрестков, т.е. системы разрешенных путей через них и их взаимное расположение чрезвычайно разнообразны по сравнению с тем ограниченным набором регулярных структур, рассматриваемых в технической научной литературе [1–3].

Кроме того, в связи со сложным характером движения на перекрестке, тесно связанного с его структурой, бесспорных, общепринятых способов формального описания дорожного движения на перекрестке, которые были бы адекватны всем аспектам проблемы управления трафиком, не существует. В связи с этим предлагаемые подходы к управлению перекрестком, в частности [3–8], применимы лишь в частных случаях, и сама проблема управления трафиком на перекрестке не рассматривается в совокупности ее аспектов. Такая ситуация контрастирует с несомненными успехами инфокоммуникационных технологий мониторинга, позволяющих обеспечить управление трафиком достоверной и полной информацией о текущем состоянии дорожного движения, как и закономерностях его изменения, которые могут быть установлены на базе исторических данных [9–11].

Настоящая работа, как и предыдущие работы авторов [12–15], направлена на поиск более универсальной трактовки проблемы управления дорожным движением на перекрестке и способов ее решения. В основу исследований положена идея *синтеза управляемого перекрестка*, (путем выработки эффективного структурно-параметрического управления им), базирующегося на общем представлении структуры перекрестков и динамики транспортных потоков. В работе в рассмотрении

вводятся ранее не изученные факторы взаимодействия между цепочками автомобилей (кластерами), проезжающими область перекрестка, и дополнительные параметры светофорного регулирования. Решение задач оптимизации параметров регулирования дает аргументы для выбора наиболее рационального структурного управления перекрестком.

1 Взаимодействие кластеров в пределах перекрестка и его связь со структурой перекрестка и параметрами светофорного регулирования

Движение транспортных средств (ТС) через перекресток (понимаемом в более широком смысле, а именно как область, включающая собственно перекресток и примыкающие участки въездных и выездных дорог) обладает рядом отличительных особенностей, которые в том или ином отношении должны учитываться при выборе структурного и параметрического управления.

Прохождение перекрестка по определенному направлению за фазу светофорного цикла осуществляется цепочками ТС (кластерами), входящими в движение с включением зеленого света. Исключения возможны, но они редки и трудноосуществимы – это, так называемая «зеленая волна», когда по определенному (магистральному) направлению транспортные средства движутся с заданной постоянной скоростью, не останавливаясь на перекрестках. В этом случае каждый кластер проходит все стоп-линии на зеленых фазах. Однако, если существенная часть движущихся ТС меняет на перекрестках направление движения с магистрального на боковое или наоборот, зеленая волна неизбежно разрушится.

В типичном случае на момент включения зеленого света кластер на дорожной полосе или его начальная часть представляет собой стоячую очередь, поэтому движение транспортных средств кластера через перекресток представляет собой связанное движение, при котором каждое последующее ТС следует за предыдущим на минимальном безопасном расстоянии (при субъективном восприятии безопасности движения водителями транспортных средств или, в случае автопилотирования, определяемого законом управления автопилотом). Перестроение между полосами на перекрестке нежелательно и практически невозможно из-за плотного движения и малого времени езды через перекресток. Такое положение дел ведет к известной предсказуемости в вероятностном смысле динамики потока. Неоднородность потока в отношении распространения в нем разных типов ТС и стилей их вождения приводит к стохастическому характеру динамики кластера. Рассматривая кластеры, формируемые на одной и той же полосе на последовательных светофорных циклах, нужно учесть и то, что количество ТС в них непостоянно. Это можно видеть из наблюдений (таблица 1). Так, при движении вдоль внешней стороны Садового кольца на пересечении с началом Олимпийского проспекта по левой (1-й) и второй слева полосе были отмечены следующие показатели проезда ТС через стоп-линию в течение последовательных циклов.

Таблица 1. Моменты пересечения транспортными средствами стоп-линии, отсчитываемые с начала зеленой фазы, с.

| Цикл | Полоса | Номера ТС на полосе | | | | | | | | |
|------|--------|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | левая | 2 | 5 | 8 | 9 | 12 | 14 | 16 | | |
| | правая | 3 | 6 | 8 | 11 | 13 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| 2.1 | левая | 1 | 5 | 7 | 9 | 11 | 16 | 18 | 20 | |
| | правая | 4 | 7 | 9 | 10 | 12 | 13 | 16 | 19 | 20 |
| 2.2 | левая | 23 | 35 | | | | | | | |
| | правая | 22 | 23 | 25 | 27 | 28 | 32 | 35 | 37 | 39 |
| 3 | левая | 1 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 | |
| | правая | 1 | 4 | 8 | | | | | | |

Наблюдения выполнялись 20.05.2022 между 12:01 и 12:09, т.е. в течение короткого периода, не изменяющего локальные характеристики транспортного потока. Здесь, с учетом высокой интенсивности трафика, за цикл проезжали только автомобили, которые к моменту включения зеленого света ждали в неподвижной очереди; при меньшей интенсивности движения к хвосту кластера присоединяются автомобили, не успевшие остановиться. Моменты их присоединения к кластеру, как и общее количество, также являются случайными. Нормальная продолжительность зеленой фазы, составлявшая 20 с, на втором светофорном цикле была по неустановленным причинам

удвоена, поэтому в таблице 1 этот цикл разбит на две половины.

Другим источником неопределенности показателей прохождения кластеров через перекресток, включая количество автомобилей в них, является нередкое для структуры перекрестка разветвление некоторых дорожных полос в его границах. Здесь мы не рассматриваем такой случай, но в дальнейшем будем его изучать.

Если бы кластеры проезжали перекресток и примыкающие к нему выходные дороги независимо друг от друга, то, с учетом неустранимости случайных колебаний показателей проезда перекрестка по отдельным трассам, при выборе параметров светофорного регулирования достаточно было бы ограничиться средними показателями — детерминированными зависимостями показателей прохождения по трассе от продолжительности зеленой фазы. Задача оптимизации параметров светофорного цикла такого рода была сформулирована ранее [14, 15]. Но такая задача дает лишь приближенную оценку оптимальных продолжительностей фаз и во многих случаях весьма неточна, поскольку не учитывает взаимодействие между кластерами, существенно влияющее на их прохождение. Это взаимодействие имеет две формы.

Первая форма взаимодействия и частично ее влияние на выбор управления уже была рассмотрена [15]. Она связана с прохождением конфликтных точек пересечения потоков. Разделение трасс между фазами светофорного цикла — так называемая *схема пофазного разъезда* — принципиально исключает их одновременное прохождение по нескольким направлениям в течение какой-либо фазы. Иными словами, конфликтные точки пересечения в принципиальном плане всегда *неактивны*. Тем не менее, они могут временно активизироваться в началах фаз — когда кластер с предыдущей фазы еще не завершил прохождение точки пересечения, а головное ТС нового кластера могло бы достигнуть этой точки, но вынуждено задерживаться. Такая временная активизация конфликтной точки пересечения наблюдается, прежде всего, в том случае, когда расстояние по трассе от стоп-линии до нее для первой трассы существенно больше, чем для второй, а в особенности если при этом первая трасса искривлена, а вторая — нет. Такие задержки могут происходить не на каждом цикле и их величины случайны. Воздействие задержки на замедление движения второго кластера и тем самым — на количество ТС в успевающих пересечь стоп-линию до включения красного света гораздо точнее оценивается при использовании вероятностных представлений трафика, но явно учитывающих и динамику движущихся ТС (чего не дают модели случайных потоков). Такие представления могут быть основаны на обработке данных наблюдений, но более целесообразный путь состоит в получении зависимостей на основе верифицированных по данным наблюдений вероятностных динамических моделях движения кластера по дорожной полосе.

Ввиду того, что отмеченные задержки, вызываемые временной активизацией точек пересечения трасс, определяются разницей во времени между моментом освобождения точки пересечения первым кластером и потенциальным моментом ее захвата вторым кластером, они уменьшаются и могут вообще исчезнуть при более раннем начале зеленой фазы для первого кластера и более позднем — для второго. Зачастую пересечение стоп-линии на конкретном входе перекрестка регулируется для разных дорожных полос разными светофорами и соответственно временные границы фаз для отдельных трасс могут быть сдвинуты относительно номинальных границ фазы. Такая возможность иногда используется и может найти более широкое применение без значительных затрат. Таким образом, возникает задача оптимизации не только продолжительности фаз, но и смещений фаз для отдельных трасс.

Рассмотрим вначале без учета этих задержек задачу оптимизации продолжительности фаз для пропуска по каждой из имеющихся R трасс потоков с требуемыми интенсивностями Q_{Rr} , $r=1, \dots, R$, при заданной продолжительности светофорного цикла T_{TLC} . В этом случае за цикл в среднем по r -й трассе должно проходить по $N_{Rr} = Q_{Rr} T_{TLC}$ транспортных средств. Определим $T_{\min r}(N_{Rr})$ как среднее значение времени, достаточного для их проезда, и пусть проезд по трассе происходит на множестве фаз M_r при их общем количестве m .

Тогда предварительные оценки оптимальных длительностей фаз определяются из задачи линейного программирования

$$s \rightarrow \max, T_{P1} + \dots T_{Pm} = T_{TLC}, \quad (1)$$

$$\sum_{k \in M_r} T_{Pk} \geq T_{\min r}(N_{Rr})(1+s), \quad r=1, \dots, R. \quad (2)$$

Максимизируемая величина определяет минимальный по всем трассам относительный резерв пропускной способности. Ее значение должно быть положительно, если при данной СПР возможно

пропустить по всем трассам потоки требуемой интенсивности; оно может использоваться для сопоставления возможностей СПР и выбора наиболее подходящей. Однако эффективная продолжительность зеленой фазы по r -й трассе уменьшается на математическое ожидание времени задержки T_{DELr} , которое может быть рассчитано через вероятностные распределения ряда величин. Заметим при этом, что наличие резерва пропускной способности необходимо для компенсации эффекта задержки.

Ограничимся случаем, когда на трассе, проходимой на второй фазе, имеется одна конфликтная точка — точка пересечения с одной трассой, проходимой на первой фазе. Обозначим ΔT_r временной сдвиг начала зеленой фазы для r -й трассы по сравнению с номинальным началом такой фазы. При расчете T_{DELr} предполагаем, что требуемое среднее количество ТС пропускается по всем трассам, несмотря на задержки; однако после расчета выясняем, так ли будет в действительности. Первая случайная величина, необходимая для расчета — это время, за которое кластер, в среднем состоящий из N_1 автомобилей, завершает проезд точки пересечения по первой трассе. Вторая — время, за которое головное ТС второго кластера достигает этой точки. Функции распределения этих величин обозначаем соответственно $F_{B1}(T_{B1}; N_1)$ и $F_{H2}(T_{H2})$. Тогда искомая величина выразится формулой

$$T_{DEL2} = \int_{T_{H2L}}^{T_{H2H}} \int_{T_{B1L}}^{T_{B1H}} \max\{T_{B1} + \Delta T_1 - T_{H2} - T_{P2} - \Delta T_2, 0\} dF_{H2}(T_{H2}) dF_{B1}(T_{B1}; N_{R1}) \quad (3)$$

Система из R нелинейных уравнений связывает значения задержек с величинами временных сдвигов фаз ΔT_r , $r=1, \dots, R$. Необходимые условия пропуска потоков требуемой интенсивности по всем трассам выражаются соотношениями

$$\sum_{k \in M_r} T_{Pk} - (T_{\min r}(N_{Rr}) + T_{DELr}) \geq 0, \quad r=1, \dots, R. \quad (4)$$

Соотношения (4) определяют оптимизационную задачу, подобную по смыслу и форме задаче (1)–(2) — задачу максимизации минимального из значений левых частей неравенств (4). Однако оптимизация здесь будет производиться не по значениям продолжительностей фаз T_{Pk} , $k=1, \dots, m$, а по значениям ΔT_r , $r=1, \dots, R$, через которые по формулам вида (3) выражаются задержки T_{DELr} . Эти зависимости являются нелинейными и не выражаемыми аналитически, что заметно усложняет задачу по сравнению с задачей линейного программирования малой размерности (1)–(2). Тем не менее, получить приемлемое приближение численными методами возможно, а требования к точности с учетом оценочного характера исходных данных невелики. Уже выполнение условий (4) является достаточным успехом оптимизации параметров регулирования. Но учет задержек позволяет обосновать последовательность фазовых схем проезда перекрестка в светофорном цикле, наиболее рациональную в конкретной дорожной обстановке; изменение такой последовательности легко реализуемо. В проблемных ситуациях на этой основе может быть установлена и желательность перейти к другой схеме пофазного разъезда.

Тем не менее, нужно подчеркнуть, что формулы типа (3) выражают искомые величины только в простом случае, когда задержки на каждой трассе происходят не более чем в одной точке пересечения. В более сложных случаях выписывание расчетных формул с целью расчета по ним нецелесообразно в силу их громоздкости и практической трудной вычислимости, расчет целесообразно выполнять методом Монте-Карло.

Сам по себе эффект потери пропускной способности перекрестка из-за рассмотренных задержек не очень велик в силу относительной краткосрочности периодов активизации точек пересечения, но при приближении к исчерпанию пропускной способности перекрестка не может быть сброшен со счетов. Помимо всего, сам этот эффект определяется в первую очередь тем, в какой последовательности схемы проезда, составляющие СПР, следуют в светофорном цикле (если проезд первой и второй трассы переставить во времени, эффект будет совсем другим). Это явление иллюстрируется примером структуры перекрестка (рис. 1а) и схем его проезда на трех фазах светофорного цикла (рис. 1б–г), в совокупности составляющих схему пофазного разъезда без активных точек слияния потоков.

Но более существенным является эффект взаимодействия кластеров при как их слиянии в пределах перекрестка, так и при их объединении в один кластер на выходной дороге.

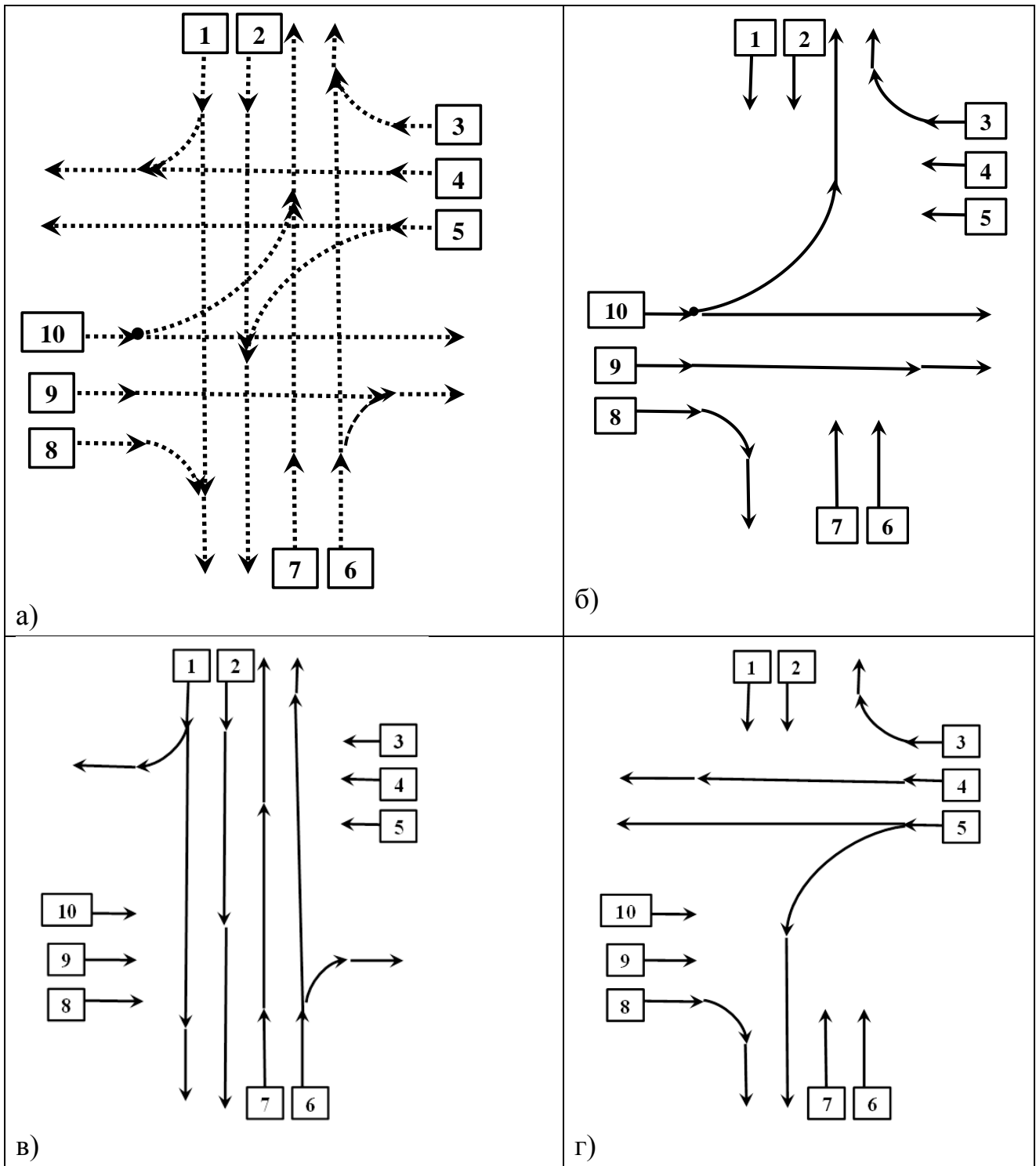


Рис. 1. Структуры перекрестка по типу пересечений Профсоюзной улицы: а) система трасс; б), в), г) схемы проездов на отдельных фазах для одной из трехфазных абсолютно бесконфликтных СПР

Возникновение временно активизируемых точек пересечения при конкретной последовательности фазовых схем проезда показывает рис. 2. Вместе с тем рис. 2 показывает отсутствие слияния кластеров на первой фазе. На второй фазе кластеры на трассах от стоп-линий 1 и 6 могут присоединиться к кластерам, прошедшим на первой фазе соответственно от стоп-линий 8 и 3.

2 Взаимодействие кластеров при их одновременном или последовательном слиянии на перекрестке и выходной дороге

Выделяются три ситуации взаимодействия между кластерами на участке трассы, начинающейся с точки слияния. Если точка активна на некоторой фазе, кластеры перемешиваются в ней, образуя объединенный кластер на выходной дороге после ее прохождения. Это происходит на всех

светофорных циклах.

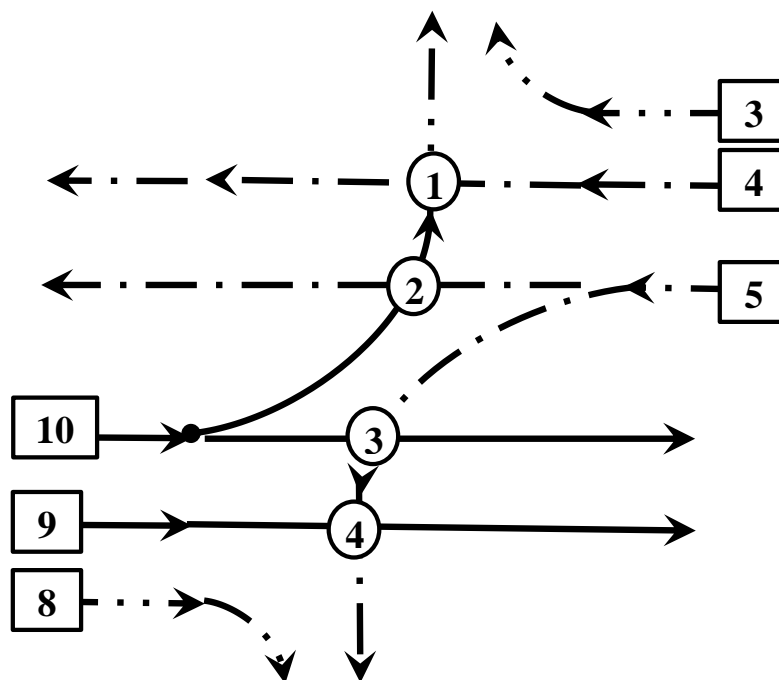


Рис. 2. Временно активизируемые ОТП на границе 3-й и 1-й фазы СПР, показанной на рис. 1

Если же точка слияния неактивна на двух последовательных фазах, то она может временно активизироваться в начале второй фазы, подобно точке пересечения. В этом случае головное ТС второго кластера задерживается на конфликтной точке слияния до момента ее освобождения первым кластером и сразу после этого второй кластер присоединяется к первому. Если же конфликтная точка слияния успевает освободиться к моменту подъезда к ней головного ТС второго кластера, то второй кластер вначале догоняет первый и, возможно, присоединяется ко второму впоследствии. Если такое объединение кластеров происходит уже после окончания второй фазы, т.е. когда состав второго кластера полностью определился, то это означает, что на данном светофорном цикле проезд перекрестка по второй трассе происходил независимо от проезда по первой трассе. Но в силу стохастического характера дорожного движения описанные ситуации для данной пары трасс будут случайным образом чередоваться.

Все эти явления требуют определения более сложных зависимостей. Так, при наличии активной точки слияния нужно определять необходимое в среднем время для пропуска через перекресток требуемых количеств ТС сразу по обеим трассам — $T_{\min rp}(N_{Rr}, N_{Rp})$, и, если r -я и p -я трассы проезжаются на одном и том же наборе фаз M_{rp} , соотношение (2) в задаче (1)–(2) должно быть заменено на

$$\sum_{k \in M_{rp}} T_{Pk} \geq T_{\min rp}(N_{Rr}, N_{Rp})(1+s), \quad r=1, \dots, R. \quad (5)$$

В такой же форме записываются и ограничения в оптимизационной задаче для разветвляющейся трассы, ветви которой не сливаются далее с другими трассами.

Если же при определенной последовательности фаз имеет место последовательное слияние кластеров на двух трассах — на перекрестке или выходной дороге — то для первой трассы это взаимодействие никак не учитывается. Для второй трассы нужно установить зависимость времени, необходимого для проезда в среднем требуемого количества транспортных средств не только от их количества, но и от среднего количества ТС в первом кластере и даже от продолжительности зеленой фазы для первого кластера. От последней зависит скорость замыкающего автомобиля первого кластера, от которой, в свою очередь, вероятно зависит возможная задержка второго кластера и момент присоединения второго кластера к первому (или факт отсутствия такой задержки или соединения кластеров до момента завершения проезда перекрестка вторым кластером). С формальной точки зрения, такое взаимодействие выразится третьим аргументом в соотношении (5); но это меняет и математическую форму задачи, делая ее нелинейной по отношению к искомой переменной — продолжительности соответствующей фазы. Главное же состоит не в форме частной

оптимизационной задачи — оптимизации продолжительности фаз светофорного цикла при задании не только схемы пофазного разъезда, но и последовательности фаз в ней, а в необходимости поиска оптимальной последовательности фаз. Заметим, что базовая задача (1)–(2), не учитывающая взаимодействия кластеров, от этой последовательности не зависит.

Другое, столь же важное обстоятельство, состоит в возможных способах построения искомым зависимостей. Пока речь идет о проезде кластера по трассе независимо от движения транспортных средств по другим трассам, т.е. при отсутствии активных точек пересечения и слияния в пределах перекрестка и свободной выходной полосе за его пределами, зависимости могут быть получены чисто на основе обработки данных наблюдения, подобных приведенным в табл. 1. При этом место наблюдения значения не имеет, если в местах наблюдения состав потока примерно одинаков, - важным является только геометрия трассы в области перекрестка.

Наоборот, гораздо труднее на основе данных наблюдения получить вероятностные зависимости от двух, а тем более трех переменных. В этом случае, по сути, не остается иного пути, кроме как получать зависимости на основе массовых вычислительных экспериментов на моделях, верифицированных и параметрически идентифицированных с помощью эмпирических данных. Концептуальная основа моделей микроуровня для такого применения, как и опыт их вычислительной реализации, отраженные в работах [13–15], постепенно развивается параллельно с исследованием проблемы структурно-параметрического управления дорожным движением на перекрестках.

Заключение

В работе отражено развитие нового подхода к комплексному решению проблемы организации и управления городским дорожным движением на регулируемых перекрестках. Основное внимание уделяется формам взаимодействия кластеров транспортных средств при проезде регулируемых перекрестков различной структуры и дальнейшем движении по выездным дорогам.

Продемонстрирована важность учета стохастической природы транспортных потоков, определены формы зависимостей, характеризующих динамику транспортных потоков в области перекрестка с позиций управления дорожным движением.

Модифицированы ранее рассмотренные частные задачи управления, рассмотрены дополнительные параметры управления, в связи с чем сформулированы новые частные задачи оптимизации параметрического управления. Рассмотрены взаимосвязи между этими задачами, расширяющие также возможности управления транспортными потоками на структурном уровне.

Литература

1. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. – 69 с.
2. Живоглядов В.Г. Теория движения транспортных и пешеходных потоков. Ростов н/Д: Известия вузов Сев.-Кавк. региона, 2005. – 1082 с.
3. Signalized Intersections: Informational Guide. Publication Number: FHWA-HRT-04-091. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation/ Federal Highway Administration, 2004.
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. 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.
6. 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.
7. Derai S., Ghouil R.H. Control isolated intersections with hybrid petri nets and hybrid automaton // EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica. Vol. 65. 2017, № 3. – P. 112–116.
8. Rida N., Ouadoud M., Hasbi A., Chebli S. Adaptive traffic light control system using wireless sensors networks // IEEE 5th International Congress on Information Science and Technology (CiSt). Marrakech, Morocco: IEEE, 2018.– P. 552–556.
9. Makovetskaya-Abramova O., Lazarev Y., Gravit M., Silla S., Shakhova M. Multiplicative method for creating the traffic monitoring base in a megapolis // E3S Web of Conferences. Vol. 164. 2020, Art. No. 03023.
10. Чебыкин И.А., Семенов С.С. Автоматизация мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2020б № 4. – С. 52–60.
11. Kazmi S.Q., Singh M.K., and Pal S. Traffic Monitoring System in Smart Cities Using Image Processing // Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability, Springer, Singapore, 2021. – P. 397–405.
12. 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.

13. *Valuev A.M., Solovyev A.A.* Problems of Synthesis of Urban Highways Intersections and Methods for Their Solution // 2019 Twelfth International Conference “Management of large-scale system development” (MLSD). IEEE Xplore Digital Library, 2019, 910983.
14. *Solovyev A.A., Valuev A.M.* Combined Intelligent Control of a Signalized Intersection of Multilane Urban Highways // Advances in Artificial Systems for Medicine and Education III. AIMEE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1126, Z. Hu, S. Petoukhov, M. He, Eds. Cham: Springer, 2020. – P. 471–480.
15. *Solovyev A.A., Valuev A.M.* Optimal Synthesis Method for Signalized Intersection of Urban Highways with Route Branching // 2021 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD). IEEE Xplore Digital Library, 2021, 9600152.