

DOI:

ПРОБЛЕМА ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТКОМ С МНОГОСТАДИЙНЫМ ПРОХОЖДЕНИЕМ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Соловьев А.А.^{1,2}, Валуев А.М.¹

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

²Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

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

Аннотация: Исследуется проблема управления перекрестком городских дорог, отличающимся разделением на секции с локальным регулированием и многостадийным проездом с остановками на внутренних стоп-линиях по некоторым направлениям. Рассмотрено решение задач структурной и параметрической оптимизации, на основе выбора схем пофазного разъезда для каждой секции, последовательностей и продолжительности фаз регулирования, для обеспечения необходимой интенсивности безопасного проезда по всем направлениям.

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

Введение¹

Городская дорожная сеть (ГДС) — это совокупность дорог (улиц) и их сопряжений. Последние играют важнейшую роль с точки зрения эффективности ГДС и безопасности движения. Исторически сложившаяся структура городской застройки, в особенности в центральных частях городов с долгой историей, вызывает необходимость в организации перекрестков сложной структуры, соединяющих множество входных и выходных направлений. Даже строительство дорогостоящих дорожных сооружений — тоннелей и мостов — для прохождения транспортными потоками таких сопряжений во многих направлениях не позволяет полностью избавиться от сложных перекрестков. Об этом свидетельствует пример Садового кольца в Москве, где в ряде мест сочетаются сложные перекрестки на площадях и транспортные тоннели под площадями. Более того, ряд сложных перекрестков был изначально запроектирован при застройке новых районов; таковы пересечения нескольких крупных магистралей с Профсоюзной улицей.

В простом перекрестке за одну светофорную фазу транспортный поток по каждому возможному направлению проходит от соответствующей стоп-линии на входе до выхода из области перекрестка без промежуточных остановок, не считая задержек в точках слияния потоков при их наличии. Каждое направление регулируется одним светофором, светофорные устройства действуют согласованно, реализуя фазы одного светофорного цикла. Пересечение направлений на любой фазе исключается.

Особенностью сложного перекрестка является невозможность исключить пересечение направлений при любой организации движения, предполагающей одностадийное, без промежуточных остановок, прохождение потоков по всем разрешенным направлениям, при разумном количестве фаз единого светофорного цикла, не превышающем четырех. В связи с этим: 1) организуются внутренние стоп-линии (ВСЛ); 2) область перекрестка делится этими стоп-линиями на секции; 3) движение в пределах каждой секции регулируется собственным светофорным циклом, причем циклы на разных секциях должны быть согласованы.

Ранее авторами [1] были определены два взаимосвязанных способа управления перекрестком для случая его одностадийного прохождения — структурный и параметрический. Первый состоит в разделении разрешенных трасс прохождения перекрестка между фазами светофорного цикла, иначе говоря, в определении *схемы пофазного разъезда* (СПР) [2]. Второй — параметрический — состоит в определении длительностей фаз при заданной СПР. Эти способы управления можно рассматривать как два уровня, где верхним уровнем является структурный, допускающий изменение СПР в течение дня, но только 1–2 раза. Параметрический способ управления — адаптация продолжительности фаз к интенсивностям потоков по направлениям — может применяться со значительно меньшими промежутками между последовательными изменениями параметров.

Для сложного перекрестка принципиально используются те же способы, но в усложненном виде. Отметим, что вопросы структурного управления перекрестком в общем виде никогда не

¹ Работа выполнена в соответствии с программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт №27, в части «Динамика транспортных потоков, научные основы проектирования оптимальных дорожных сетей».

рассматривались. При этом разными авторами предлагались различные методы оценки, выбора и оптимизации параметров светофорного цикла [3–6], но они не являются универсальными, не охватывают реально встречающихся структур перекрестков. Изучаемые здесь многосекционные перекрестки тем более не рассматривались в литературе в аспекте управления транспортными потоками.

Итак, в рассматриваемом случае схемы пофазного разъезда должны быть выбраны отдельно для каждой секции перекрестка; при этом разделяются между фазами только участки трасс в пределах каждой секции. Для прохождения направлений в целом имеет значение не только отнесение их секционных участков к определенным фазам для своих секций, но и последовательность фаз всех циклов, от которой зависят задержки на ВСЛ. Такое управленческое решение промежуточного уровня можно считать дополнительным параметром структурного управления. Наконец, параметрическое управление состоит в определении продолжительности фаз всех светофорных циклов при известном структурном управлении, а также временных сдвигов между ними; желательно, чтобы при этом продолжительности самих циклов были одинаковыми.

В настоящей работе предложены методы решения отдельных задач, составляющих проблему оптимизации управления перекрестком с многостадийным прохождением транспортных потоков, их применение проиллюстрировано на примере перекрестка, построенного по типу перекрестка на Серпуховской площади.

1 Структура сложного перекрестка

С точки зрения прохождения транспортных потоков перекресток рассматривается как система разрешенных трасс — осевых линий дорожных полос. Структура перекрестка определяется набором этих трасс, их связью с входными и выходными дорогами и взаимным расположением. У трасс имеются характерные точки — начало, конец и точки, в которых трассы пересекаются, соединяются или разделяются. В отношении динамики транспортных средств точки пересечения, слияния и разделения являются особыми точками (ОТ) и, соответственно, обозначаются здесь ОТП, ОТС, ОТР; с позиции организации дорожного движения это *конфликтные точки*. Начальная точка трассы на перекрестке (вход перекрестка) есть точка пересечения оси полосы со стоп-линией; такая точка называется далее входом перекрестка. Пересечение трассы с внутренней стоп-линией также является особой точкой. Концом трассы — выходом перекрестка — следует считать точку за последней ОТ трассы, расположенную от нее на таком расстоянии, при котором любое транспортное средство, передний бампер которого достиг этой ОТ, не препятствует прохождению ОТ в других направлениях. Транспортное средство (ТС), проехавшее последнюю конфликтную точку и удалившееся от нее (передним бампером) на расстояние, позволяющее другим транспортным средствам проезжать ее, завершило проезд перекрестка и может считаться выехавшим с него. Это заведомо безопасное расстояние складывается из максимальной длины транспортного средства, и максимального отклонения от конфликтной точки корпуса ТС, проходящего ее в другом направлении. Точка на трассе на определенном таким способом безопасном расстоянии от конфликтной точки считается концом трассы на перекрестке — выходом перекрестка. Аналогично, как и в случае простого перекрестка, определяются особые точки (ОТ) на трассе: ОТ входа (ОТВх), ОТ выхода (ОТВых), а также ОТ остановки на внутренней СЛ (ВСЛ) — ОТВО.

Внутренние СЛ делят перекресток на секции, но это деление имеет в первую очередь не геометрическое, а структурное (графовое) выражение и означает также определенные ограничения на структуру системы трасс. Если трасса пересекает внутренние СЛ, то каждый такой рубеж делит ее на участки и считается границей одностадийного участка трассы. Для многостадийного прохождения перекрестка, у каждой трассы с двумя и более стадиями, проходимой за две или более стадии, участок для первой стадии заканчивается первой ОТВО на ней, а для последней стадии — начинается с последней ОТВО. Если имеются промежуточные одностадийные участки, они начинаются и заканчиваются на ВСЛ и не имеют ОТВО внутри себя. Если на трассе нет ОТВО, то она рассматривается как одностадийная трасса.

Секция перекрестка объединяет все одностадийные участки трасс, начинающиеся на некотором множестве входных или (или) внутренних стоп-линий и заканчивающиеся в ОТВых или ОТВО. Основанием для объединения набора трасс в секцию перекрестка служит регулирование их проезда системой светофоров, реализующих один светофорный цикл (СЦ). Последнее, в свою очередь, связано с наличием общих ОТП или ОТС у этих трасс. Для исключения пересечения потоков на этих ОТП и минимизации одновременного проезда ОТС трассы разделяются по фазам этого СЦ, т.е. формируется схема пофазного разъезда в пределах секции.

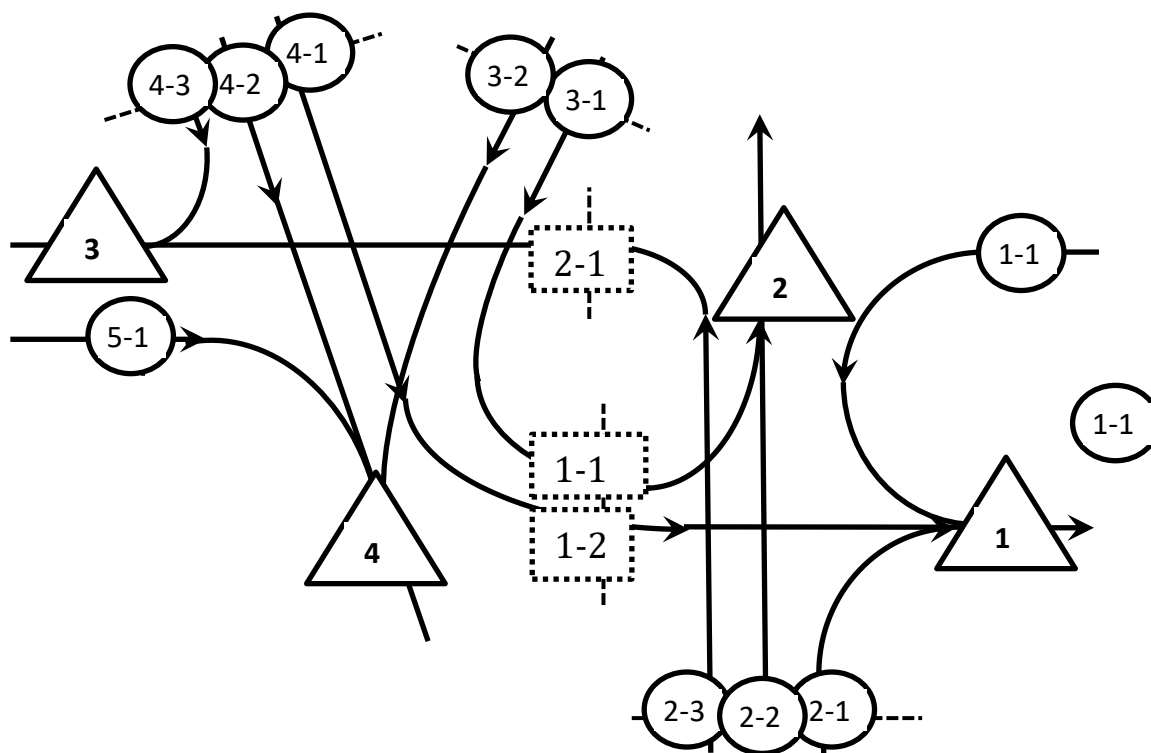


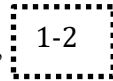


Рис. 1. Структура сложного перекрестка (по типу перекрестка на Серпуховской площади в Москве)

Условные обозначения:  — ОТВх,  — ОТВых,  — ОТВО

В примере, показанном на рис. 1, разветвления трасс отсутствуют; все ОТС находятся на выходах перекрестка. Внутренние стоп-линии делят область перекрестка на восточную и западную секции. Ввиду отсутствия ветвления трасс, они взаимно-однозначно соответствуют входам и будут далее именоваться соответственно. Трасса 2-3 начинается с восточного участка и завершается западным; для трасс 3-1 и 4-1 начальным участком является западный, а конечным — восточный. Остальные трассы целиком лежат в пределах одной секции.

2 Структурное и параметрическое управление сложным перекрестком

Ввиду того, что каждая секция сложного перекрестка имеет отдельное светофорное регулирование, схемы пофазного разъезда могут определяться независимо для каждой секции. В пределах секции относящиеся к ней одностадийные участки трасс вместе с соединяющими их ОТ формируют ориентированный граф путей через секцию перекрестка, на основе которого могут быть определены всевозможные СПР в пределах секции перекрестка, с возможным ограничением на максимальное количество активных точек ОТС на фазе и их общее количество. Алгоритм решения такой задачи ничем не отличается от алгоритма порождения всевозможных СПР для перекрестка с одностадийным прохождением всех трасс, представленном в работе [1]. Способ определения всевозможных СПР для секции (с ограничениями на уровень конфликтности в пределах секции) не отличается от определения набора абсолютно или условно бесконфликтных СПР для целого перекрестка с одностадийным прохождением потоков. Для секции выделяются наборы входов (на въездах в перекресток или на внутренних СЛ) и выходов (на выездах из перекрестка или ВСЛ), определяется уровень конфликтности для каждой пары входов как максимальный уровень конфликтности между исходящими из них трассами. Затем, на основе этих данных за несколько циклов определяются нерасширяемые множества входов, удовлетворяющие заданному ограничению на уровень конфликтности. Наконец, определяются всевозможные наборы таких множеств, покрывающие всё множество входов, причем количество элементов таких наборов не должно превышать максимального допустимого количества фаз.

В рассматриваемом примере на основе анализа по типу предложенного в работе MLSD2019-BC, можно утверждать, что существуют две *нерасширяемые* трехфазные СПР без активных ОТС в восточной секции, первая с наборами трасс по фазам (1-1, 2-2, 2-3), (2-1, 2-2, 2-3), (3-1, 4-1), а вторая — (1-1, 3-1), (2-1, 2-2, 2-3), (3-1, 4-1). Здесь имеются в виду восточные участки трасс 3-1 и 4-1. Для западной секции существует единственная *нерасширяемая* СПР с наборами трасс по фазам (2-3, 5-1), (3-1, 3-2, 4-3), (4-1, 4-2, 4-3).

Однако организация движения через перекресток как в форме комбинации СПР для отдельных секций, лишь до некоторой степени может выбираться на основе качественных оценок, — исходя из ограничений на количество конфликтных точек.

Для выбора параметров светофорного регулирования необходима информация о распределении потоков по направлениям. Организация движения транспорта через перекресток практически всегда исключает неоднозначность маршрута от определенного входа к определенному выходу. В связи с этим определенное количественное распределение потоков между маршрутами в целом приводит и к определенному распределению потоков между участками маршрутов в пределах каждой секции.

Приближенная оптимизация совокупности светофорных циклов, то есть определение условно оптимальных длительностей фаз (при заданной и одинаковой для всех секций продолжительности всего цикла T_{TLC}) может быть выполнена на основе ранее выдвинутой идеи представления задачи оптимизации светофорного управления в форме задачи линейного программирования. Сама эта задача, не меняясь по заложенному в ней подходу, модифицируется на случай многосекционного перекрестка. Идея задачи состоит в том, что для каждого направления (трассы) продолжительность обслуживаемых его фаз (для каждой секции, через которую проходит трасса) должна быть достаточна для пропуска поступающего за цикл входящего потока. При этом исходят из оцениваемой при среднем ожидаемом количестве проходящих ТС интенсивности потока на трассе. Последняя рассматривается для случая плотного потока с типичным (средним) составом ТС в нем. Следует оговорить, что если поток является менее плотным, частично состоящим из свободных, т.е. движущихся независимо друг от друга автомобилей, то и интенсивность его будет меньше. Но такая ситуация не составляет угрозы образования затора, поскольку в этом случае при недостаточности продолжительности фаз для прохождения частично свободного потока не прошедшие за цикл автомобили составят очередь перед стоп-линией. Тогда на следующем цикле поток по трассе, как всякий поток из пришедшей в движение очереди, станет плотным, а следовательно, пройдет по трассе в требуемом количестве ТС. К сказанному нужно добавить, что расчетная интенсивность потока на определенной трассе, пересекающей более одной секции, а значит, проходимой за несколько стадий, может отличаться на разных стадиях. Это связано с тем, что односекционные участки трассы могут различаться по своей кривизне: типично, когда один участок прямой или слабо искривленный, а другой содержит крутой поворот. В этом случае средние скорости движения на участках будут существенно различаться, а значит, будет различаться и временной интервал между последовательными ТС — величина, обратная искомой интенсивности потока.

Рассмотрим задачу условной оптимизации светофорных циклов (СЦ), используя пример перекрестка, показанного на рис. 1. Пусть для каждой секции выбран первый вариант СПР. Обозначим продолжительность i -й фазы в восточной и западной секции соответственно D_{Ei} и D_{Wi} . Для количества ТС, которые должны пройти за полный цикл по трассам, будем использовать обозначения Q_{1-1}, \dots, Q_{5-1} , а для расчетного времени прохождения потока на трассе (участка трассы для соответственно восточной и западной секции) — величины $t_{E1-1}, \dots, t_{W5-1}$. Следует отметить, что последние величины не являются константами, а зависят от первых, т.е. должны использоваться зависимости типа $t_{E1-1}(Q_{1-1})$; значения таких зависимостей могут быть либо получены непосредственно на основе обработки данных наблюдения потоков на данном перекрестке, либо рассчитаны по верифицированной математической модели [7]. Поскольку задача оптимизации светофорных циклов решается при известных значениях Q_{1-1}, \dots, Q_{5-1} , наличие таких зависимостей (которые могут быть рассчитаны заранее) не составляет проблемы для вводимой задачи оптимизации. Проблему вызывает, как будет видно ниже, наличие вариантов и дополнительных аргументов этих зависимостей в определенных случаях и обязательно — для многостадийных трасс: если считать, что известные количества ТС Q_{1-1}, \dots, Q_{5-1} перед началом движения составляли стоящие очереди, а во время движения свободно уходили за конец трассы (ее участка), получаем первый базовый вариант; если, наоборот, стартующие цепочки ТС полностью останавливались на ВСЛ — второй базовый вариант. Разумеется, для этих вариантов будут разные зависимости; какую уместно применить, можно установить из простого логического анализа СПР и выбранной последовательности фаз. Может оказаться, что при найденных условно оптимальных продолжительностях фаз для некоторых трасс

осуществляются промежуточные варианты, при которых часть стартующей цепочки проходит ВСЛ без остановки, а оставшаяся останавливается перед ней.

С указанными величинами ставятся задачи определения оптимальной продолжительности фаз, наилучшим образом обеспечивающих прохождение требуемого количества ТС по всем направлениям. «Наилучшее» уместно понимать в минимаксном смысле, максимизируя минимальное из относительных превышений определяемых продолжительностей фаз над необходимой по всем трассам.

В соответствии с принятой СПР отсюда имеем задачу:

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & s \rightarrow \max, \\
 (2) \quad & T_{E1} + T_{E2} + T_{E3} \leq T_{TLC}, \quad T_{W1} + T_{W2} + T_{W3} \leq T_{TLC}, \\
 (3) \quad & t_{E1-1}(1+s) \leq T_{E1}, \quad t_{E2-1}(1+s) \leq T_{E2}, \quad t_{E2-2}(1+s) \leq T_{E1} + T_{E2}, \\
 (4) \quad & t_{E2-3}(1+s) \leq T_{E1} + T_{E2}, \quad t_{W3-1}(1+s) \leq T_{E3}, \quad t_{W4-1}(1+s) \leq T_{E2}, \\
 (5) \quad & t_{E2-3}(1+s) \leq T_{W1}, \quad t_{W3-1}(1+s) \leq T_{W2}, \quad t_{W4-1}(1+s) \leq T_{W3}, \\
 (6) \quad & t_{W3-2}(1+s) \leq T_{W2}, \quad t_{W4-2}(1+s) \leq T_{W3}, \quad t_{W4-3}(1+s) \leq T_{W2} + T_{W3}, \\
 (7) \quad & t_{W5-1}(1+s) \leq T_{W1}.
 \end{aligned}$$

Неравенства вместо равенств в (2) выражают то обстоятельство, что между фазами могут быть промежутки, в течение которых проезд стоп-линий запрещен и лишь находящиеся в пределах перекрестка движущиеся ТС продолжают свое движение. Данная задача линейного программирования имеет весьма малую размерность и не порождает вычислительных затруднений.

Появляются также дополнительные обстоятельства, в силу которых задача типа (1)–(7) дает лишь предварительное решение задачи оптимизации параметров светофорного регулирования на сложном перекрестке. На перекрестке ограничено место для очередей транспортных средств перед внутренними стоп-линиями, занимая которое в ожидании зеленого света, эти ТС не создают помех для движения по другим трассам. Выйдя за границы этого места, очередь ТС преграждает прямой путь по некоторой трассе и заставляет в лучшем случае совершать маневры по объезду конца очереди, уменьшая тем самым скорость прохождения перекрестка и увеличивая вероятность аварий.

В худшем случае, при дальнейшем увеличении своей длины очередь перед ВСЛ делает прохождение трассы вообще невозможным. Такого рода конфликт должен быть устранен или хотя бы минимизирован, как за счет правильного выбора параметров СЦ в секции, так и за счет согласования последовательности фаз во взаимосвязанных секциях, т.е., с одной стороны, за счет ограничения количества ТС, поступающих к ВСЛ за одну зеленую фазу, а с другой — путем уменьшения времени ожидания перед ней. Наличие ВСЛ не означает, что все проходящие через нее ТС обязательно останавливаются на ней, образуя очередь. Если в момент достижения транспортным средством ВСЛ светофор, управляющий ее прохождением, находится в зеленой фазе, это ТС проходит ее без остановки и не включается в очередь.

Наконец, исключение применяемыми СПР одновременного прохождения особых точек ОТП и, возможно, особых точек ОТС по разным направлениям на одной фазе минимизирует, но не полностью исключает возможные конфликты в связи с их прохождением. Движение конкретного ТС, начавшись на соответствующей зеленой фазе, может продолжаться в течение некоторого времени и после ее окончания. Только после того, как хвост цепочки ТС, отбывших по определенной трассе, минует все возможные ОТП и ОТС на ней (или на ее секционном участке), проезд этих конфликтных точек по другим направлениям станет безопасным. Поэтому нужно определять самое раннее время, когда головное ТС следующей цепочки сможет безопасно достигнуть такой точки. Гарантировать эту безопасность средствами светофорного регулирования означает определять моменты начала фаз с учетом этого обстоятельства. Впрочем, необходимый сдвиг начала фазы может быть чисто условным, если считать, что включение зеленого света для потенциально конфликтующей трассы не должно приводить к немедленному началу движения первого автомобиля у стоп-линии или же это движение должно быть более медленным. В этом случае ответственность за безопасное прохождение этого участка трассы целиком ложится на водителей; но, помимо этого, при выборе продолжительности фаз нужно будет учесть и такое замедление движения по таким трассам в начале зеленых фаз.

3 Информационное обеспечение задач структурного и параметрического управления сложным перекрестком

До сих пор не было описано получение необходимых величин. Как уже отмечалось, необходимые зависимости типа $t_{E1-1}(Q_{1-1})$ принципиально могут быть получены путем обработки данных наблюдения. А именно, наблюдая прохождение транспортных потоков (ТП) по всевозможным трассам на известном перекрестке, можно фиксировать, какое количество ТС пересечет входную (или внутреннюю) СЛ за определенное время. Однако, этих данных может быть недостаточно, поскольку, во-первых, максимальная продолжительность фактически использовавшихся ограничена. Во-вторых, как видно из предыдущего, нужно учитывать не только необходимое время для отъезда цепочки автомобилей определенной длины, но и время, за которое первый и последний автомобиль цепочки достигает находящихся на трассе особых точек. Следует подчеркнуть, что такого рода информация полезна и для параметрического управления простыми перекрестками, так как и для них подобные конфликты возможны и должны быть исключены. В связи с этим более удобным и вполне адекватным решаемой задаче является расчет этих зависимостей по верифицированной и параметрически идентифицированной модели «микроуровня», явным образом описывающей динамику взаимосвязанного движения отдельных ТС в цепочке. В развитие подхода, описанного в [7], следуя общепринятым установкам в области микромоделирования ТП, представленным в монографии [8], мы рассматриваем управление транспортным средством как выбор ускорения в зависимости от его положения, скорости, текущего времени и динамики предшествующего ТС (лидера). Этот выбор характеризуется законом управления в форме $U_i(\Delta x_i(t), \dot{x}_{L(i,t)}(t), \dot{x}_i(t), \ddot{x}_{L(i,t)}(t), j)$, где $\Delta x_i(t)$ — расстояние между задним бампером лидера и передним — преследователя. Явная зависимость выбора ускорения преследователя от ускорения лидера имеет место только при сокращении расстояния между ними до минимального безопасного. В частности, это характерно для пересекающихся перекрестков цепочек ТС. В остальных случаях постулируются три возможных режима ускоренного движения: «ускорение нормального разгона», «ускорение нормального торможения» и нулевое значение при достижении максимальной разрешенной или максимальной возможной по условию безопасного прохождения искривленных участков трассы скорости. В этом есть известное упрощение, но при моделировании массового процесса, каким является трафик на перекрестке, невозможно и ненужно воспроизведение индивидуальных характеристик и черт управления отдельными транспортными единицами в составе автомобиля и его водителя. Мы исходим из рационального предположения, что, за исключением случая плотного преследования лидера (а при приближении к СЛ — и для него) выбор ускорения диктуется условиями: 1) не превышения максимальной разрешенной скорости; 2) не превышения максимальной безопасной скорости прохождения искривленных участков трассы; 3) недопущения проезда СЛ на красный свет и 4) недопущения конфликтной ситуации при приближении к не освободившейся ОТП или ОТС и к хвосту предыдущей цепочки на той же трассе.

Для параметрической идентификации режима «ускорение нормального торможения» достаточно воспользоваться общераспространенными данными о фактической зависимости минимального безопасного расстояния от скоростей лидера и преследователя (или только от последней, т.к. они близки), полученными при наблюдении квазистационарных потоков. Напротив, типичное «ускорение нормального разгона» можно определить только путем наблюдений за разгоняющимися цепочками ТС. По нашим наблюдениям для трасс различной кривизны на перекрестке, аналогом которого является представленный на рис. 1, за десяти секундные временные промежутки после включения зеленого света в среднем пересекали СЛ от 2,7 до 4,5 ТС с определенной закономерностью относительно номера такого интервала. Эти данные и позволили найти приближенные средние значения требуемых параметров. Результаты расчета моментов прохождения особых точек первыми и последними ТС в цепочках при длительности всех фаз, равной 20 секундам (сек.), и использовании первой СПР, приведены в таблице 1. Каждый расчет (вычислительный эксперимент) касается прохождения одной трассы, номер которой показывает пятый знак кода расчета. При этом вычислительные эксперименты, код которых заканчивается на 0, относятся ко всей трассе, на «E» и «W» — соответственно к прохождению восточного и западного участка трассы. Использование рассчитанных величин показано в следующем разделе.

Следует отметить, что в таблице представлена лишь выборка из результатов расчета, которая показывает прохождение первого и последнего ТС в цепочке при длительности зеленой фазы в 20 с. С помощью единственного расчета мы получаем данные и для фаз другой продолжительности; при этом, естественно, количество ТС в цепочке будет другим.

Таблица 1. Моменты и режимы прохождения ОТ головными и хвостовыми ТС

Код расчета	Номер узла	Расстояние от начала трассы, метров	Номер ТС	Момент достижения узла, сек.	Код расчета	Номер узла	Расстояние от начала трассы, метров	Номер ТС	Момент достижения узла, сек.
SP6T00	1	400	1	0.0000	SP6T60	61	400	1	0.0000
SP6T00	1	400	10	19.4761	SP6T60	61	400	8	59.7527
SP6T00	2	460	1	14.1421	SP6T60	36	420	1	48.1650
SP6T00	2	460	10	28.3682	SP6T60	36	420	8	63.6579
SP6T10	11	400	1	0.0000	SP6T60	63	440	1	51.5470
SP6T10	11	400	10	39.4370	SP6T60	63	440	8	66.7536
SP6T10	2	435	1	30.8012	SP6T60	53	450	1	52.9099
SP6T10	2	435	10	44.8801	SP6T60	53	450	8	68.1339
SP6T10	2	1200	1	30.8012	SP6T60	44	470	1	55.2753
SP6T10	2	1200	10	44.8801	SP6T60	44	470	8	70.7856
SP6T10	2	1400	1	30.8012	SP6T60	66	480	1	56.3299
SP6T10	2	1400	10	44.8801	SP6T60	66	480	8	72.1908
SP6T20	21	400	1	0.0000	SP6T60	67	520	1	60.0000
SP6T20	21	400	10	19.4543	SP6T60	67	520	8	111.8596
SP6T20	21	400	20	36.1021	SP6T60	23	565	1	63.4521
SP6T20	22	420	1	8.1650	SP6T60	23	565	8	119.1677
SP6T20	22	420	10	22.8723	SP6T6E	67	520	1	0.0000
SP6T20	22	420	20	38.9869	SP6T6E	67	520	8	56.0293
SP6T20	23	440	1	11.5470	SP6T6E	23	565	1	52.2474
SP6T20	23	440	10	25.6231	SP6T6E	23	565	1	52.2474
SP6T20	23	440	20	41.4343	SP6T6E	23	565	8	63.1963
SP6T30	31	400	1	0.0000	SP6T6W	61	400	1	0.0000
SP6T30	31	400	10	19.4784	SP6T6W	61	400	8	56.0316
SP6T30	32	420	1	8.1650	SP6T6W	61	400	8	56.0316
SP6T30	32	420	10	23.0146	SP6T6W	36	420	1	48.1650
SP6T30	33	435	1	10.8012	SP6T6W	36	420	1	48.1650
SP6T30	33	435	10	25.3583	SP6T6W	36	420	8	59.7079
SP6T30	34	472	1	15.4919	SP6T6W	63	440	1	51.5470
SP6T30	34	472	10	32.8890	SP6T6W	63	440	8	62.7446
SP6T30	35	512	1	19.3218	SP6T6W	53	450	1	52.9099
SP6T30	35	512	10	77.7484	SP6T6W	53	450	8	64.0962
SP6T30	36	532	1	20.9762	SP6T6W	44	470	1	55.2753
SP6T30	36	532	10	81.2572	SP6T6W	44	470	8	66.5243
SP6T30	37	552	1	22.5093	SP6T6W	66	480	1	56.3299
SP6T30	37	552	10	84.0536	SP6T6W	66	480	8	67.6112
SP6T40	41	400	1	0.0000	SP6T70	71	400	1	0.0000
SP6T40	41	400	10	39.4784	SP6T70	71	400	10	59.4781
SP6T40	43	460	1	34.1421	SP6T70	36	420	1	48.1650
SP6T40	43	460	10	48.7042	SP6T70	36	420	10	63.0019
SP6T40	44	488	1	37.1270	SP6T70	54	475	1	55.8114
SP6T40	44	488	10	52.0525	SP6T70	54	475	10	70.2422
SP6T40	45	500	1	38.2574	SP6T80	81	400	1	0.0000
SP6T40	45	500	10	53.3756	SP6T80	81	400	10	39.4091
SP6T40	46	540	1	41.6025	SP6T80	81	400	20	55.8846
SP6T40	46	540	10	57.3938	SP6T80	37	430	1	30.0000
SP6T40	22	560	1	43.0940	SP6T80	37	430	10	44.1085
SP6T40	22	560	10	59.1953	SP6T80	37	430	20	59.8501
SP6T40	2	580	1	44.4949	SP6T90	91	400	1	0.0000
SP6T40	2	580	10	60.8573	SP6T90	91	400	10	19.3645
SP6T50	51	400	1	0.0000	SP6T90	54	425	1	9.1287
SP6T50	51	400	10	39.4782	SP6T90	54	425	10	23.3040
SP6T50	53	457	1	33.7840					
SP6T50	53	457	10	48.2035					
SP6T50	54	477	1	36.0208					
SP6T50	54	477	10	50.4825					

4. Пример оценки и выбора управления для перекрестка представленной структуры

Для перекрестка, структура которого показана на рис. 1, при 10 входных полосах имеется четыре выходных. Полагая пропускную способность одной полосы равной 1800 ТС/час, мы приходим к заключению, что для пропуска всего входящего потока он должен не превышать 7200 ТС/час с определенными ограничениями на его распределение по входам. А именно, исходя из направлений проезда перекрестка по отдельным полосам, должны соблюдаться следующие ограничения:

$$Q_{1-1} + Q_{2-1} + Q_{3-1} \leq 1800, Q_{2-2} + Q_{4-1} \leq 1800, \\ Q_{2-3} + Q_{4-3} \leq 1800, Q_{3-2} + Q_{4-2} + Q_{5-1} \leq 1800.$$

Легко видеть, что данные ограничения удовлетворяются при следующих значениях параметров:

$$Q_{1-1} = Q_{2-1} = Q_{2-3} = Q_{3-1} = Q_{3-2} = Q_{4-1} = Q_{4-2} = Q_{5-1} = 600, Q_{2-2} = Q_{4-3} = 1200.$$

Для пропуска таких потоков продолжительности всех фаз должны быть приблизительно одинаковы, если не принимать во внимание различия в скорости движения из-за искривления трасс. Будем обозначать фазы для восточной и западной части перекрестка соответственно E1, E2, E3, W1, W2, W3.

Назначив продолжительность всех фаз равной 20 сек., убеждаемся, что этого достаточно для пропуска через входные стоп-линии входящих потоков по всем полосам, кроме трассы от входа 4-1. При общей продолжительности светофорных циклов, в результате равной 1 минуте, за это время на входы поступает соответственно 10 и 20 ТС. Назначенная продолжительность фаз не может быть уменьшена, т.к. десятые ТС пересекают входную ТС на последней секунде зеленой фазы. Для трассы от входа 4-1 за 20 сек. зеленой фазы W3 через входную стоп-линию успевают пройти только 8 автомобилей. Это связано с тем, что эта трасса более искривленная, а потому головное ТС каждой очередной цепочки, а следом и другие движутся по ней несколько медленнее, чем по другим трассам. Кроме того, тормозит движение и необходимость остановиться перед ВСЛ 1-2, т.к. за 20 сек. даже головное ТС не может успеть ее пересечь и перейти в восточную секцию. Итак, перекресток обеспечивает проезд с указанной интенсивностью не по всем трассам; на вход 4-1 должен поступать поток с интенсивностью, не большей 480 ТС/час.

Проанализируем дальнейшее движение по трассам на перекрестке. Имеем в восточной части перекрестка: цепочка ТС от входа 1-1 покидает перекресток через 28,37 сек., а головное ТС цепочки ТС от входа 2-1, проходящей на следующей фазе, должно достигать выхода через 30,80 сек. начала цикла. Временной промежуток между ними в 2,43 сек. достаточен для безопасного движения (в хвосте первой цепочки он составляет 1,69 сек.). В свою очередь, хвост второй цепочки достигает выхода через 44,88 сек. начала цикла, а головное ТС следующей цепочки (от входа 3-1) может достичь этого выхода уже через 44,49 сек. от начала цикла, а для безопасности нужно, чтобы этот момент был не ранее 44,88+1,69 = 46,57 сек. Следовательно, начало E3 для упрощения безопасного прохождения цепочек от входа 3-1 без ухудшения его условий должно быть сдвинуто, по крайней мере, на 2 сек.. В этом случае хвост цепочки достигнет выхода через 62,85сек. от начала цикла (2,85 сек. от начала следующего цикла). Это никак не мешает движению следующей цепочки, голова которой достигает выхода только через 14,14 секунд с начала цикла. Что касается точки пересечения между трассами от входов 1-2 и 1-3 и от входа 3-1, они будут пройдены хвостом последней цепочки — даже с учетом задержки начала E3 на 2 сек. — приблизительно за 6 сек. до моментов достижения их головными ТС от входов 1-2 и 1-3. Не потребуется даже сдвигать момент окончания E3, т.к. и в случае сдвига ее начала оставшегося времени достаточно для прохождения всей цепочки от входа 3-1. Такое более быстрое прохождение цепочкой из 10 ТС стоп-линии по сравнению с другими случаями связано с тем, что в остальных случаях к моменту начала зеленой фазы вся цепочка стояла, а данном случае — двигалась.

Что касается цепочек от входа 4-1, то они целиком останавливаются на внутренней стоп-линии уже после завершения фазы E3 на текущем цикле и проходят ее на следующем цикле. В этом случае для пересечения внутренней стоп-линии с учетом сокращенной длины цепочки от входа 4-1 этих 18 секунд хватает и для нее. Перейдем к анализу западной секции перекрестка. На фазе W1 движение по трассе от входа 5-1 происходит беспрепятственно, если к расчетному времени достижения головой цепочки выхода через него полностью прошла цепочка от входа 4-2. Это не имеет места, поскольку первое событие расчетно происходит через 9,13 сек., а второе через 10,24 сек. после начала цикла. С учетом необходимого временного промежутка между последовательными ТС, составляющего в данном случае не менее 1,6 сек., получается, что цепочка от входа 5-1 должна быть задержана минимум на 3,1 с. Но продолжительность W3 для ее прохождения не может быть уменьшена. Следовательно, вариант W3 для входа 5-1 должен быть сдвинут не менее чем на 3,1 сек. и не более чем на 36,0-(23,3+1,6)=11,1 сек..

Последнее время было рассчитано как расчетная разность между моментами выхода последнего ТС первой цепочки и появления первого ТС второй с необходимого временного промежутка с учетом необходимого временного промежутка между этими событиями. С другой стороны, прохождение на той же фазе западной части трассы от входа 2-1, которая начинается от ВСЛ 2-1, требует завершения прохождения через пересечение этой трассы с трассами от входов 4-1 и 4-2 и выхода за пределы перекрестка цепочки от входа 4-3 к моментам достижения соответствующих точек головным ТС цепочки от ВСЛ 2-1. Сопоставление рассчитанных моментов этих событий показывает, что при выбранных продолжительностях фаз это происходит. Последняя проверка касается прохождения цепочек через пересечение трасс от входов 3-1 и 4-1. Первая цепочка может затормозить вторую, но расчетно этого не происходит. Вторая цепочка останавливается перед ВСЛ 1-2 и стоит там в момент прохождения первой. Если бы длина второй цепочки была достаточно велика, то она перегородила бы первую из двух трасс; в данном случае этого не происходит. Кстати, и цепочка от входа 3-1 могла бы в ожидании фазы W1 преградить трассу от входа 4-1. Но и для нее этого не происходит из-за малой длины цепочки. Стоит, однако, увеличить общее время цикла (без изменения пропорций между продолжительностями фаз) приблизительно в 1,2 раза, и возникнет такая неблагоприятная ситуация, ведущая к затору. Стоит отметить, что на простом перекрестке подобные ограничения, хотя и менее жесткие, также существуют, т.к. очереди на входах не должны разрастаться до предшествующих перекрестков.

Наконец, при отсутствии сдвига между светофорными циклами на секциях перекрестка по нашим расчетам по трассе от входа 2-1 автомобиль, находящийся непосредственно у входной стоп-линии, успевает за один цикл пересечь обе секции перекрестка, а остальные проходят весь перекресток за два цикла. Эта ситуация совершенно необязательна и даже несет в себе элемент опасности из-за неопределенности поведения водителей в начале цепочки. Избежать ее можно за счет небольшого сдвига западного цикла относительно восточного. В отношении прохождения трассы от входа 3-1 такой сдвиг даст тот же эффект, как и рассмотренный ранее вариант с переносом начала фазы E3.

Приведенный анализ показывает, что и в случае «идеального» распределения потоков по направлениям, позволяющего наиболее полно использовать его пропускную способность, «очевидное» решение по выбору параметров требует его анализа, отчасти неформального, с использованием расчетов динамики ТП.

Выводы

В настоящей статье демонстрируются возможности оптимизации управления проходом транспортных потоков через перекресток сложной структуры, возникающие при этом задачи и способы их решения, в развитие подхода, предложенного в [9, 10]. Показано, что адекватное управление перекрестком, позволяющее наиболее полно использовать его пропускную способность для обеспечения требуемой интенсивности трафика по всем разрешенным направлениям его прохода требует детального учета структуры и геометрии трасс движения на перекрестке и адекватного представления динамики потоков.

Предлагаемый подход не может в полной мере учесть случайный характер дорожного движения, но открывает новые пути для развития в этом направлении. Представляется, что значительные перспективы открывает не развитие традиционных вероятностных подходов, основанных на представлении трафика в виде совокупности случайных потоков и игнорирующих динамику и взаимодействие реальных транспортных потоков, а ввод вероятностных соотношений в представление транспортных потоков в форме гибридных динамических систем — событийно-переключаемых процессов.

Литература

1. *Валуев А.М., Соловьев 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.
2. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. – 69 с.
3. *Живоглядов В.Г.* Теория движения транспортных и пешеходных потоков. Ростовн/Д: Известия вузов Сев.-Кавк. региона, 2005. – 1082 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. *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,
6. *Derai S., Ghoul R.H.* Control isolated intersections with hybrid petri nets and hybrid automaton // *EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica*. Vol. 65.2017, no. 3.— P. 112–116.
7. *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>
8. *Treiber M., Kesting A.* *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. — xiii+504 p.
9. *Валуев А.М., Соловьев А.А.* Оптимизация структуры и параметров светофорного цикла в целях повышения безопасности // *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD’2018): труды Одиннадцатой междунар. конфер., 1–3 окт. 2018 г., Москва: в 3 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос.акад. наук; под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Т. 2. — С. 143–148.*
10. 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.