

НОВЫЙ ПОДХОД К ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ К РЕГУЛИРУЕМЫМ ПЕРЕКРЕСТКАМ ГОРОДСКИХ АВТОДОРОГ

Соловьев А.А., Валуев А.М.

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

Аннотация. Проанализированы предпосылки к использованию методов автоматического управления для светофорного регулирования на перекрестке при постоянном мониторинге локального транспортного потока. Определён набор возможных контролируемых показателей локального трафика. Представлены методология и результаты компьютерных экспериментов по выявлению наиболее эффективных методов регулирования.

Ключевые слова: регулируемый перекресток, схема пофазного разъезда, светофорный цикл, мониторинг, оптимизация, вычислительные эксперименты.

Введение

Значение регулируемых перекрестков состоит в том, что через них проходит и перераспределяется между направлениями основной объем дорожного движения в городской дорожной сети (ГДС) в любом достаточно крупном российском и не только российском городе. К примеру, на всем протяжении крупнейших московских магистралей — Ленинского проспекта и Профсоюзной улицы с проспектом 60-летия Октября от их начала на площади Гагарина — все их сопряжения с другими магистральями имеют именно такую форму. При этом, однако, проблема эффективного управления такими перекрестками, особенно в условиях высокой интенсивности трафика и приближения к пределу использования пропускного ресурса ГДС, по-прежнему далека от выработки надежных решений.

Основная сложность организации пропуска транспортных потоков через перекресток состоит в необходимости сбалансировать проезд по множеству направлений, количество которых может достигать до 12. При этом их интенсивность меняется во времени одновременно случайным и закономерным образом. Например, интенсивность движения в центр Москвы в утренние часы пик гораздо выше, чем из центра, а вечером наоборот; сильное влияние оказывают крупные транспортные происшествия, которые могут на значительное время затруднить и даже заблокировать движение на отдельных дорогах. Сочетание закономерной и случайной изменчивости транспортной обстановки не позволяет выработать устойчивые значения параметров регулирования для определенного времени суток чисто опытным путем, методом проб и ошибок. Кроме того, структуры перекрестков, т.е. системы путей их проезда их взаимное расположение, чрезвычайно разнообразны по сравнению с ограниченным набором регулярных структур, которые рассматриваются в научной и технической литературе [1–3, 16]. Поэтому невозможно свести решение проблемы регулирования перекрестками для реальных случаев к ограниченному набору типовых рекомендаций.

Необходимость адаптации управления транспортным потоком в ГДС и, в частности, на регулируемых перекрестках, к текущей транспортной ситуации неоспорима. Исторически, до массового распространения светофорного регулирования, такая адаптация производилась регулировщиком, непосредственно наблюдающим движение транспорта по разным направлениям. Такой способ управления не до конца ушел в прошлое. Так, один из авторов наблюдал ручное регулирование в попытке преодолеть неэффективность действия светофоров на нескольких перекрестках Алматы в утренний час пик в октябре 2011 года. Можно предположить, что при этом когнитивная нагрузка на регулировщика выше, чем на авиадиспетчера, который должен реагировать на движение всего нескольких летательных аппаратов в зоне своей ответственности; поэтому ошибочные решения неизбежны.

Несомненно, что магистральным направлением существенного совершенствования систем управления дорожным движением в ГДС является не возврат к архаической практике ручного регулирования, а в определенном смысле воссоздание ее лучших сторон на современной основе, с применением методов автоматизированного и автоматического управления. В настоящее время возможности такого способа решения проблемы надежно подкреплены успешным развитием современных инфокоммуникационных технологий, которые, в частности, эффективно используются для контроля за соблюдением правил дорожного движения на магистральных. Применительно к рассматриваемым задачам применение современных ИКТ, в первую очередь, включает фиксацию и диджитализацию текущей дорожной обстановки и тенденций ее изменения, а также накопление

исторических данных обо всех аспектах дорожного движения и управления им в местах наблюдения. На этой основе могут устанавливаться в автоматическом режиме и важные закономерности. При этом, правда, нужно иметь в виду, что регулируемые перекрестки являются наиболее проблематичными элементами ГДС с точки зрения проявления в них динамики транспортных потоков и факторов неопределенностей. Последнее обстоятельство затрудняет предсказательное прогнозирование развития дорожной обстановки, особенно с учетом того, что такие прогнозы должны быть вероятностными. Но оно же дает преимущество методам автоматического управления, не требующим такого прогноза.

Известные 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 достаточно полной информацией о текущем состоянии дорожного движения, и позволяет установить закономерностях его изменения на базе накопленных исторических данных [9-11]

Настоящая работа, как и предыдущие работы авторов [12–15], направлена на поиск более универсальной трактовки проблемы управления дорожным движением и способов ее решения на основе структурно-параметрического представления регулируемого перекрестка. Решение задач оптимизации параметров регулирования, в том числе и методами автоматического управления, введенными в настоящей работе, дает аргументы для выбора наиболее рационального структурного управления перекрестком.

1. Факторы, влияющие на прохождение регулируемого перекрестка транспортными потоками

Две основные черты регулируемого перекрестка состоят в следующем. Во-первых, перекресток предназначен для сопряжения входных и выходных дорог, а поэтому допускает, как правило, не менее двух направлений проезда от каждого входа. Во-вторых, в целях безопасности направления проезда разделены между фазами светофорного цикла так, чтобы не допускать проезда точек пересечения направлений одновременно по двум направлениям ни на какой фазе. Одновременное слияние потоков также нежелательно, поэтому такую возможность также стремятся минимизировать.

Из этих двух черт следуют многие особенности проезда регулируемого перекрестка. Во-первых, для большинства направлений проезд перекрестка возможен не на всех фазах. Исключениями могут служить некоторые правые повороты. Отсюда вытекает неизбежность задержки части приходящих через перекресток ТС в очередях перед стоп-линиями. Это приводит также к определенному характеру движения через перекресток: каждая очередь, если маршрут проезда перекрестка не разветвляется, превращаются в кластеры связанного движения на всем маршруте. Автомобили, прибывающие в течение зеленой фазы, также, по преимуществу, присоединяются к кластеру.

Кроме того, наличие нескольких направлений, проезжаемых на одной фазе, при неодинаковой интенсивности движения на каждом, затрудняют подбор продолжительностей фаз, обеспечивающих проезд прибывающего потока по всем направлениям. Для одной входной дороги проезд может быть разрешен для разных полос на разных фазах, что выражает разделение направлений между фазами светофорного цикла. Однако, если полоса разветвляется на самом перекрестке, разделение во времени проезда по таким расходящимся маршрутам становится невозможным. В целом, в группе направлений, проезжаемых на одной фазе, могут оказаться направления с разными интенсивностями, причем устанавливаемые временные доли фаз в светофорном цикле должны обеспечивать проезд по наиболее загруженному направлению в каждой группе.

Данная цель — обеспечение проезда всех прибывающих ТС по требуемым им направлениям без роста очередей перед стоп-линиями — не всегда достижима, поскольку ее реализации может мешать недостаточная пропускная способность самого перекрестка, некоторых выходных дорог или последующих перекрестков. При наличии возможности ее достижения это должно быть обеспечено эффективным регулированием. Иначе, должны быть рассмотрены компромиссные варианты с ограничением пропуска по отдельным или даже всем направлениям (об этом ниже). Определение адекватных параметров регулирования невозможна без знания интенсивности входных потоков и их распределения по направлениям.

В качестве примера для исследования проблемы применения методов автоматического управления к регулируемым перекресткам с помощью компьютерных экспериментов рассмотрим Т-образный перекресток с трехфазным светофорным циклом, структура которого и схемы проезда на фазах представлены на рисунках 1–3. Применяемая схема пофазного разъезда исключает

одновременный проезд по двум направлениям точек пересечения и слияния потоков. На рисунках маршруты проезда перекрестка, разрешенные на определенной фазе, показаны сплошными линиями, а запрещенные — пунктиром. Данный пример в достаточной степени иллюстрирует сложность проблемы выбора рациональных параметров регулирования. Налицо шесть входов, от которых прибывающие ТС распределяются между восемью маршрутами, реализующими шесть направлений проезда перекрестка, причем условия проезда, как по времени (разрешенные и запрещенные фазы), так и по геометрии трасс для всех маршрутов различны. При этом в распоряжении системы управления всего три переменные — продолжительности трех фаз, а при фиксации продолжительности всего цикла число свободных переменных сокращается до двух.

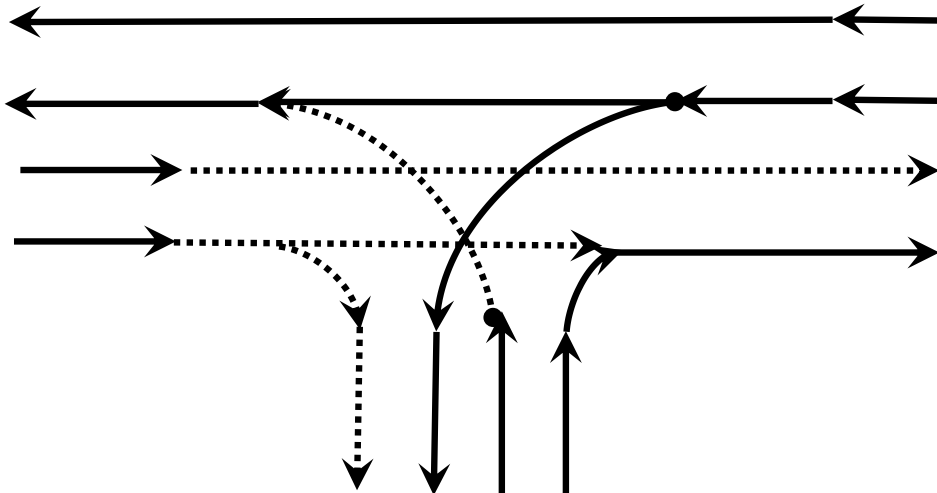


Рис. 1. Фаза 1

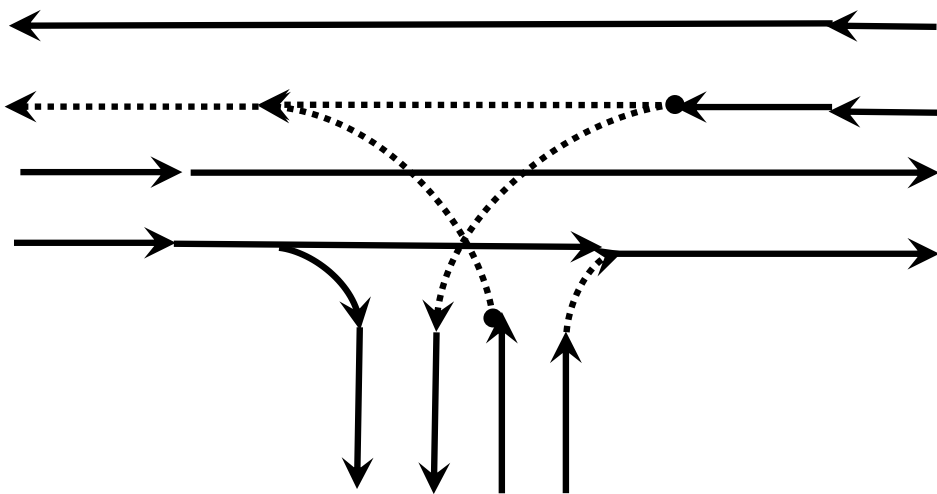


Рис. 2. Фаза 2

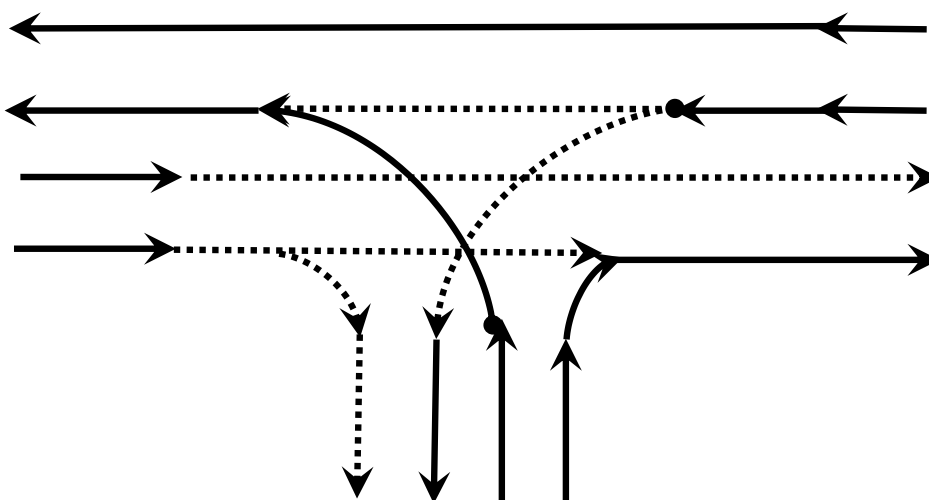


Рис. 3. Фаза 3

2. Предпосылки для применения методов автоматического управления к перекрестку со светофорным регулированием и возможные их формы

На основе обработки данных постоянного локального мониторинга транспортных потоков устанавливаются закономерности изменения интенсивности потоков по разным направлениям в пределах суточного, недельного и годового циклов. Однако эти закономерности проявляются лишь как определенные тренды. В силу множества случайных факторов, влияющих на дорожное движение, показатели текущей транспортной обстановки могут быть далеки от средних значений. В этих условиях регулирование, ориентированное на средние показатели, устанавливаемые на основе исторических данных, зачастую, не может предотвратить нарастание затруднений вплоть до локального транспортного коллапса.

По существу, установление текущих характеристик локальных транспортных потоков и выработка адаптирующегося к ним регулирования представляет единую задачу, так как без первого невозможно второе. Но необязательно ориентироваться именно на интенсивности потоков, поскольку, в силу наличия случайных факторов, они не являются непосредственно наблюдаемыми величинами и могут быть оценены лишь с заметными погрешностями, с запаздыванием или путем применения не вполне достоверной экстраполяции. Эмпирическое исследование потоков на перекрестках в густой городской дорожной сети часто обнаруживает быстрое изменение интенсивности потоков на протяжении временных интервалах порядка получаса и даже менее продолжительных.

Данные, которые можно использовать с наименьшим запаздыванием, — это размеры очередей и проезд ТС по маршрутам на предшествующем цикле. Однако в силу, возможно, незначительного количества проезжающих за цикл ТС на некоторых направлениях такие показатели (в абсолютном или относительном измерении) имеет смысл определять за несколько циклов. Таким образом, определение параметров регулирования исходя по преимуществу из длин очередей (что соответствует принципам автоматического регулирования), или, исходя из усредненной интенсивности потоков за короткие временные интервалы — в любом случае сталкиваются с погрешностями оценивания текущей локальной дорожной обстановки. Тем не менее, в случае быстро изменяющейся интенсивности входных потоков при достаточной информационной поддержке методы автоматического регулирования будут иметь преимущество.

Принцип автоматического регулирования — компенсация отклонений от желательного (нормативного) или, точнее, прогнозируемого желательного, в нашем случае, протекания процесса — реализуем при наличии наблюдаемых (измеряемых) показателей таких отклонений и наличия средств управления, способных определенным образом компенсировать воздействие отклонений.

В отличие от классических методов автоматического управления непрерывным процессом, в том числе процессом движения при заданной нормативной траектории, управление перекрестком должно производиться в дискретном времени. Кроме того, что сами средства управления — переключения светофоров — имеют дискретный характер, само дорожное движение в рамках рассматриваемых задач характеризуется дискретной последовательностью событий, главные из которых состоят в появлении очередного ТС на конкретном входе перекрестка и пересечении им стоп-линии. Такие события могут быть зафиксированы с помощью технических средств; их совокупность служит

источником данных для регулирования. При установке под дорожным полотном на дорожной полосе перпендикулярно к ее оси индукционного датчика фиксируются моменты пересечения положения датчика передним и задним бампером транспортного средства. Возможно также выяснения моментов таких событий на основе обработки кадров видеонаблюдения при надлежащем расположении видеокамеры.

3. Целевые показатели для методов автоматического регулирования светофорного управления перекрестком

Общая цель управления состоит в уменьшении задержек при пересечении области перекрестка. Задержки на конкретной полосе на определенном временном промежутке связаны с длинами очередей перед стоп-линией (на начало и конец зеленой фазы) и количеством ТС, проезжающих по маршрутам, начинающимся на этой полосе, в течение одного цикла. В случае длинных очередей, не успевающих прийти в движение в течение нескольких светофорных циклов, определяется среднее время ожидания проезда по соотношению длин очередей и количества ТС, покидающих перекресток в течение зеленой фазы за один цикл.

Если в течение фазы предусмотрен проезд по нескольким направлениям, определяется среднее и максимальное значение для этих направлений, на основании чего формально определяется показатель задержки для всей фазы. Смысл регулирования состоит в перераспределении продолжительности фаз в пользу той, для которой показатель задержки принимает максимальное значение.

Фиксация моментов проезда каждым ТС, проезжающим перекресток по определенной дорожной полосе заданного рубежа (стоп-линии или условной границы перекрестка) вкуче с тем фактом, что порядок ТС на полосе в зоне перекрестка не изменяется, позволяет получить интегральную информацию, характеризующую проезд транспортного потока через перекресток. Неизменный порядок движения автомобилей на полосе позволяет однозначно определять, какой именно автомобиль (идентифицируемый порядковым номером в отношении пересечения границы перекрестка) является очередным, пересекающим стоп-линию. Непрерывная фиксация пересечения отдельными ТС стоп-линии в течение одной фазы по определенной входной полосе позволяет установить количества ТС, проезжающих перекресток от определенного входа в течение каждой фазы. Фиксируя моменты прибытия $(t_{j10}, t_{j20}, \dots)$, последовательных ТС к j -му входу и моменты пересечения ими же стоп-линии $(t_{j11}, t_{j21}, \dots)$, можно определить время ожидания проезда стоп-линии k -м ТС как $t_{jk1} - t_{jk0}$.

При известной длине $L(t_0, j)$ начальной очереди для j -го входа (в ночные часы она равна нулю), по значениям $t_{j10}, t_{j20}, \dots, t_{j11}, t_{j21}, \dots$ для всех ТС, которые либо достигли входа после момента t_0 , либо находились в очереди на момент t_0 , текущая длина очереди в любой заданный момент времени t^* , определяется следующим выражением

$$L(t^*, j) = L(t_0, j) + \left(\max_{t_{jko} \leq t^*} k - \max_{t_{jko} \leq t_0} k \right) - \max_{t_{jk1} \leq t^*} k. \quad (1)$$

Таким образом, при знании моментов появления всех ТС на входе и моментов начала проезда ими перекрестка определение текущей длины очереди не требует непосредственной фиксации очереди в данный момент времени t^* .

Установление величин t_{j11}, t_{j21}, \dots позволяет устанавливать количество ТС, покинувших перекресток на j -м направлении движения за любую зеленую фазу и, вообще, за любой период времени. Таким образом, появляется возможность соотнести длину каждой очереди для проезда перекрестка по определенному направлению движения с интенсивностью этого движения.

4. Обоснование выбора метода автоматического регулирования и его параметров для типовых ситуаций с помощью вычислительных экспериментов

Принципиальные черты динамики очередей при определенном методе регулирования зависят от особенностей возникновения входного потока, его типа (свободный, связанный, частично связанный) и его состава в отношении распределения в нем разных типов ТС. Первое и последнее из перечисленного не изменяется или мало изменяется во времени для конкретного перекрестка в силу того, что основной контингент ТС совершает поездки по определенным маршрутам на регулярной основе по всем будним и (или) выходным дням.

Ситуации формирования типов потока разнообразны, но постоянны, поскольку определяются локальной организацией дорожного движения. Поток может быть стационарного (ациклического) типа, когда входной дорогой является загородное шоссе или он формируется от съезда с длинной без светофоров городской магистрали. В других случаях, поток квазициклический и его цикличность определяется ближайшим светофором на входной дороге. В условиях крупного города часто расстояние между ближайшими светофорами измеряется несколькими сотнями метров. В свою очередь, это может быть светофор на ближайшем перекрестке и светофор на пешеходном переходе. В обоих случаях поток поступает порциями, между которыми, особенно в случае близкого расположения перекрестка, образуются достаточно крупные промежутки без транспортных средств. На регулируемом перекрестке поток может поступать и постоянно, но с разной интенсивностью на разных его фазах.

Главной характеристикой потока в рамках рассматриваемых задач является временной интервал между достижением определенного рубежа (в данном случае, условного входа перекрестка).

4.1. Компьютерное воспроизведение проезда через перекресток

Для оценки ожидаемых результатов оперативного выбора параметров светофорного регулирования первоочередное значение имеет использование достоверной эмпирической информации, позволяющей предсказать количественные характеристики проезда перекрестка. При этом важно установление не только средних значений, но и вероятностных характеристик, как в любой системе массового обслуживания, которой, по существу, и является регулируемый перекресток.

Приведем примеры получения и обработки данных, на которых может базироваться обоснование выбора метода автоматического регулирования. Числовые характеристики случайного процесса проезда по маршруту могут быть получены путем многократного наблюдения движения отдельных кластеров через стоп-линию. Непосредственное значение имеют моменты пересечения стоп-линии первым, вторым и последующими ТС. Практические руководства по управлению трафиком, в частности [16], указывают на то, что, начиная с четвертого ТС в кластере временные промежутки между последовательными ТС становятся в среднем одинаковыми.

В таблице 1 показаны результаты наблюдения проезда ТС по искривленному маршруту, обеспечивающему разворот с внутренней стороны Вальной улицы на внешнюю в восточной части Серпуховской площади. Стоп-линия находится в конце разворота, а очереди — на двух параллельных. Приведенные данные относятся к нескольким светофорным циклам, зафиксированным 27.04.2023 и 30.04.2023 в дневные часы, при отсутствии выраженного затруднения в движении.

Таблица 1. Моменты пересечения стоп-линии ТС в кластере (Серпуховская площадь)

Номер кластера	Порядковые номера ТС в кластере										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	4	6	8	10	13	16	19	21	23	
2	1	4	6	9	13	16	18	22	25	28	30
3	1	4	7	10	13	14	16	18	21	25	30
4	1	7	10	14	17	20	23	26			
5	1	5	9	11	14	16	18	20	23	25	28
6	1	5	10	13	17	20	23	26			
7	4	8	10	13	17	19	22				
8	3	7	12	14	16	19	21				
9	5	7	9	12	14	18	21				

Для сравнения, в те же дни наблюдалось пересечение стоп-линии на трассе, соединяющей Большую Якиманку с Большой Полянкой. В этом месте дорога перед стоп-линией прямая, а вскоре после нее сворачивает налево, но кривизна маршрута здесь гораздо ниже и существенно не влияет на скорость движения. Характерные результаты наблюдения приведены в таблице 2. Несмотря на фрагментарность данных, видно, что, в целом, движение идет быстрее. Так, седьмой по счету автомобиль достиг стоп-линии на первой трассе более чем за двадцать секунд, а на второй таких не было (это подтверждают и данные, которые здесь не приводятся за недостатком места).

Таблица 2. Моменты пересечения стоп-линии ТС в кластере (поворот на Большую Полянку)

Номер кластера	Порядковые номера ТС в кластере																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	3	7	9	11	13	15	18	20	22	23	25	27	30	31				
2	1	3	5	7	10	12	13	16	17	19	21	23	24	26	28	29	30	32
3	2	4	8	9	13	15	18	21	23	25	28	31	33					

Для воспроизведения возможных реализаций процесса проезда перекрестка, в совокупности соответствующих его вероятностным характеристикам, удобнее брать за основу временные интервалы между пересечениями стоп-линии последовательными ТС, а для головных ТС кластера — интервалы между переключением светофора и пересечением стоп-линии. Такие интервалы, особенно для начальных ТС, рассматриваются по отдельности для разных порядковых номеров. Результаты, полученные для рассматриваемого маршрута проезда Серпуховской площади, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Статистическое распределение интервалов между моментами пересечения стоп-линии последовательными ТС в кластере (Серпуховская площадь)

Интервал	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8
1	0,111	0,000	0,000	0,000	0,111	0,000	0,000
2	0,111	0,444	0,333	0,333	0,222	0,444	0,286
3	0,222	0,222	0,333	0,556	0,556	0,556	0,429
4	0,444	0,111	0,333	0,111	0,111	0,000	0,143
5	0,000	0,222	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,111	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
В среднем	3,44	3,11	3,00	2,78	2,67	2,56	2,43

4.2. Компьютерное воспроизведение входящего потока

В отличие от моментов старта движения конкретного ТС через перекресток, конкретные моменты достижения входа перекрестка менее важны. Наиболее существенным является факт прибытия определенного количества ТС в течение зеленой фазы — в этом случае, при отъезде всей очереди, вновь прибывающие ТС, как правило, успевают присоединиться к отъезжающему кластеру — или вне зеленой фазы. На динамику очередей, помимо разбега ТС в течение зеленых фаз, влияет не только случайный характер входного потока, но и его временная структура, определяемая условиями его формирования. Эти факторы постепенно вводятся в наше рассмотрение.

4.3. Организация вычислительных экспериментов для Т-образного перекрестка и анализ их результатов

Стохастический характер дорожного движения в ГДС, в том числе в области перекрестка требует принять в расчет, что один и тот же по своим интегральным показателям транспортный поток может иметь множество возможных реализаций на уровне совокупностей траекторий отдельных транспортных средств. С уверенностью делать выводы о преимуществах того или иного метода регулирования можно только на основе анализа их действия на представительном наборе таких реализаций.

В связи с этим обстоятельством организация вычислительных экспериментов предполагает определенную систему, иерархию. А именно, на верхнем уровне определяется структура, геометрия перекрестка и схема пофазного разбега. Далее, определяются условия формирования входящих потоков. При этих общих условиях определяются интенсивности входящих потоков по каждому направлению, причем не только в целом, но и по отдельным стадиям цикла формирования потока.

Все эти условия, в совокупности, позволяют определить набор реализаций входных последовательностей. Для совокупности таких реализаций в целях сопоставимости результатов определяются одни и те же наборы значений длин входных очередей (количеств ТС в них) и начальные продолжительности фаз светофорного цикла. Далее предполагается, что продолжительность светофорного цикла не изменяется, но может перераспределяться между фазами. Такая совокупность данных вместе позволяет выполнить расчеты динамики очередей на каждой реализации входных последовательностей при использовании в отдельном расчете одного из

способов регулирования из заданного их набора. Последние задаются оценочными показателями, определяющими способ автоматического управления продолжительностями фаз.

В качестве примера приведем результаты расчета десяти реализаций транспортного потока с одинаковыми заданными интенсивностями по каждому направлению для четырех способов регулирования: 1) постоянная продолжительность фаз (ПФ); 2) максимальная длина очереди по направлениям текущей фазы, транспортных единиц (определяется в начале фазы) (МОч); 3) суммарная длина очереди транспортных единиц по направлениям текущей фазы (определяется в начале фазы) (СОч); 4) суммарное время задержки для ТС, проезжающих перекресток на текущей фазе (СЗ).

В данном расчете рассматривается проезд Т-образного перекрестка, Входы на основной дороге при движении справа налево имеют номера 10 (левая полоса), 11 (правая полоса), в противоположном направлении 20 (левая полоса), 21 (правая полоса), на боковом въезде 30 (левая полоса), 31 (правая полоса). В таблице 4 показаны средние значения показателей за получасовой промежуток времени (30 циклов по 60 с.), для характерных реализаций с номерами 3 и 9 и для совокупности реализаций. Более подробные данные представлены для проезда от входов 10, 21 и 30, поскольку пропускная способность для потоков по направлениям, начинающимся на них, недостаточна. Регулирование по способу СОч, как видно, в наибольшей степени обеспечивает перераспределение ресурсов в пользу 11 для выравнивания условий проезда между наиболее загруженными направлениями.

Таблица 4. Результаты одного вычислительного эксперимента

Номер входа	№ реализации	Метод регулирования	Средняя очередь	Макс очередь	Средняя задержка одного ТС, с.	Макс. задержка, с.	Мин. задержка, с.
10	Средн.	ПФ	67.66	125.90	392.73	737.46	50.25
10	Средн.	МОч	59.60	99.90	344.72	566.30	52.17
10	Средн.	СОч	53.39	90.50	300.44	512.85	51.31
10	Средн.	СЗ	59.62	102.80	345.79	586.70	49.66
10	3	ПФ	78.57	146	425.50	802.31	48.48
10	3	МОч	67.63	120	361.78	640.48	51.51
10	3	СОч	56.67	97	296.30	535.75	52.37
10	3	СЗ	68.63	130	375.26	696.70	46.90
10	9	ПФ	68.47	125	416.63	724.63	39.15
10	9	МОч	61.43	100	365.95	577.00	46.90
10	9	СОч	55.70	91	321.74	513.98	45.89
10	9	СЗ	64.13	105	386.51	603.05	37.11
11	Средн.	ПФ	0.55	19.80	2.93	112.56	0.00
11	Средн.	МОч	0.61	19.80	3.30	114.23	0.00
11	Средн.	СОч	0.57	19.80	3.22	115.98	0.00
11	Средн.	"СЗ"	0.57	19.80	2.98	111.15	0.00
20	Средн.	ПФ	9.15	19.50	56.16	137.29	11.39
20	Средн.	МОч	14.42	32.00	107.70	276.92	3.14
20	Средн.	СОч	8.49	20.00	51.78	143.60	16.50
20	Средн.	СЗ	14.80	33.70	114.75	282.92	1.94
20	3	ПФ	14.67	19	96.19	136.86	33.41
20	3	МОч	19.80	44	152.17	400.85	0.00
20	3	СОч	21.67	30	151.76	209.89	78.75
20	3	СЗ	19.50	43	148.21	308.67	6.32
20	4	ПФ	6.90	19	37.63	129.30	8.16
20	9	МОч	13.47	31	83.36	208.02	3.48
20	9	СОч	8.63	18	52.09	128.80	13.05
20	9	СЗ	15.60	34	109.25	269.16	1.34
21	Средн.	ПФ	47.74	73.40	343.84	562.31	147.56
21	Средн.	МОч	36.91	63.50	277.77	540.08	28.46
21	Средн.	СОч	44.53	71.70	323.66	561.19	133.49
21	Средн.	СЗ	36.24	63.90	276.43	584.41	22.33
21	3	ПФ	35.53	54	245.20	397.71	152.00
21	3	МОч	32.70	62	242.98	686.97	0.00

Продолжение таблицы 4.

Номер входа	№ реализации	Метод регулирования	Средняя очередь	Макс очередь	Средняя задержка одного ТС, с.	Макс. задержка, с.	Мин. задержка, с.
21	3	СОч	43.17	74	304.54	545.20	135.41
21	3	СЗ	34.70	66	257.50	516.32	13.43
21	9	ПФ	55.27	76	396.84	610.93	139.20
21	9	МОч	43.57	67	318.50	524.22	73.65
21	9	СОч	47.27	71	342.91	585.36	145.83
21	9	СЗ	39.40	62	293.88	605.17	58.30
30	Средн.	ПФ	12.99	21.00	93.76	166.27	27.92
30	Средн.	МОч	37.55	68.50	350.01	724.55	46.31
30	Средн.	СОч	35.78	60.40	320.60	542.18	67.99
30	Средн.	СЗ	37.27	66.70	347.60	779.56	37.21
30	3	ПФ	11.17	18	82.67	141.20	19.71
30	3	МОч	38.97	70	428.33	907.09	90.06
30	3	СОч	33.70	61	324.92	560.18	103.38
30	3	СЗ	37.53	62	346.19	694.00	0.00
30	9	ПФ	11.83	20	83.94	143.89	15.26
30	9	МОч	36.50	53	336.16	500.08	59.80
30	9	СОч	37.80	58	347.29	549.87	55.10
30	9	СЗ	37.40	59	369.32	604.69	45.24
31	Средн.	ПФ	1.74	5.60	6.98	33.09	0.00
31	Средн.	МОч	4.61	15.30	33.96	169.59	0.00
31	Средн.	СОч	1.98	6.00	8.85	36.22	0.00
31	Средн.	СЗ	5.24	17.60	38.41	188.86	0.00

В следующей таблице 5 показаны средние показатели применения методов регулирования в рассмотренном примере, рассчитанные по совокупности реализаций. В нечетных строках приведены средние показатели по совокупности входов, т.е. по всему потоку, в нечетных — максимальные по входам. Можно видеть, что автоматическое регулирование разными методами в данном случае не привело к сокращению совокупных параметров задержки, зато уменьшило задержки на наиболее загруженных направлениях, что может быть не менее важной целью. Данный эффект проявился для всех методов регулирования, но наиболее значительно — по методу СОч, т.е. при принятии в качестве целевого показателя суммарной длины очереди транспортных единиц по направлениям текущей фазы.

Таблица 5. Общие показатели применения методов регулирования в вычислительном эксперименте

Метод регулирования	Средняя очередь	Макс очередь	Средняя задержка одного ТС, с.	Макс. задержка, с.	Мин. задержка, с.
ПФ	23,31	44,20	149,40	291,50	39,52
	67,66	125,90	392,73	737,46	147,56
МОч	25,62	49,83	186,24	398,61	21,68
	59,60	99,90	350,01	724,55	52,17
СОч	24,12	44,73	168,09	318,67	44,88
	53,39	90,50	323,66	561,19	133,49
СЗ	25,62	50,75	187,66	422,27	18,52
	59,62	102,80	347,60	779,56	49,66

5. Проблемы применения методов автоматического управления

В настоящей работе рассмотрены базовые условия для применения методов автоматического управления к светофорному регулированию перекрестка. В более широком контексте цели и задачи управления находятся в зависимости от текущей локальной дорожной обстановки и ее развития.

- Если при адекватном выборе параметров светофорного регулирования (которые требуется установить!) пропускная способность перекрестка и выходных дорог достаточна для проезда поступающих ТС по всем направлениям, цель состоит в минимизации задержек — в среднем на одно ТС или с дополнительными требованиями сбалансировать направления по этому показателю.

- Если проезд поступающих ТС по некоторому направлению ограничен пропускной способностью выходной дороги и не осуществим в полном объеме, цель в отношении таких направлений состоит в максимально возможном пропуске. Если выезд на такую дорогу осуществляется на нескольких фазах, требуется какой-то компромисс. Для остальных направлений/фаз задачи прежние.
- Может быть учтено в качестве ограничения ограниченное место на некоторых входах перекрестка.

6. 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.

Применение методов автоматического управления, обеспечивающих наиболее оперативную реакцию на текущие данные мониторинга дорожного движения, представляется перспективным направлением в управлении трафиком, как на уровне отдельного перекрестка, так и на более крупных фрагментах сетей городских автодорог. В настоящей работе предложены общие схемы и на примере приведено обоснование возможностей таких методов, опирающееся на обработку данных наблюдения.

Установление преимуществ и выбор определенного метода и его параметров предполагает сопоставление их результатов для типичных, по существу одинаковых условий для всех способов управления. Такая работа требует сбора и обработки большого массива данных регулярного мониторинга. Основы методологии такого сопоставления, однако, уже выработаны и описаны в настоящей работе.

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. – 2015. – Vol. 55. – 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. – 2017. – Vol. 1, No. 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. – 2017. – Vol. 187. – P. 198–205.
7. Derai S., Ghoul R.H. Control isolated intersections with hybrid petri nets and hybrid automaton // EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica. – 2017. – Vol. 65, No. 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. – 2020. – Vol. 164. – Art. No. 03023.
10. Чебыкин И.А., Семенов С.С. Автоматизация мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2020. – №4. – С. 52–60.
11. Kazmi S.Q., Singh M.K., 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. *Валуев А.М.* Вероятностное моделирование прохождения транспортных потоков через регулируемый перекресток с разветвляющимися трассами // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021): труды Четырнадцатой международной конференции, 27–29 сентября 2021 г., Москва / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна; – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 388–396.
16. MnDOT Traffic Signal Timing and Coordination Manual. – Minnesota Department of Transportation, 2017. – P. 2-11