

# ОЦЕНКА ТЕКУЩЕЙ ЛОКАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ОБСТАНОВКИ ПУТЁМ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАФИКА

Соловьев А.А., Валуев А.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Москва, Россия

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

*Аннотация. Развивается новый подход к регулированию трафика на перекрестке методами автоматического управления. Рассмотрено его информационное обеспечение данными локального мониторинга и вероятностными зависимостями для динамики транспортных потоков. Компьютерное моделирование показывает снижение задержек и возможность выбора эффективного метода регулирования для конкретной дорожной ситуации.*

*Ключевые слова: регулируемый перекресток, пространственно-временная структура транспортного потока, схема пофазного разъезда, светофорное регулирование, мониторинг, оптимизация, вычислительные эксперименты.*

## Введение

Роль регулируемых перекрестков в городской дорожной сети (ГДС) состоит в том, что через них перераспределяется между транспортными корреспонденциями основной объем дорожного движения. При этом проблема эффективного управления такими перекрестками, особенно в условиях высокой интенсивности трафика и приближения к пределу пропускной способности, остается острой. Это обстоятельство особенно важно в связи с тем, что светофорное регулирование дорожного движения на перекрестках является основным способом управления транспортными потоками в ГДС.

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 чрезвычайно многообразны. Поэтому невозможно свести решение проблемы регулирования перекрестками для реальных случаев к ограниченному набору типовых рекомендаций.

Несомненно, что регулирование, адаптирующееся к текущей транспортной обстановке, потенциально более эффективно, чем регулирование с фиксированными параметрами, даже изменяемыми в пределах дня в соответствии с заданным расписанием. Это связано с наличием большого количества факторов, благодаря которым количественные характеристики локальных транспортных потоков, даже с усреднением по времени, не являются предсказуемыми с приемлемой погрешностью в детерминированном представлении. Но эти же факторы, которые при отсутствии глобальных возмущений движения в дорожной сети приводят к вероятностному характеру таких величин, затрудняют их оценивание. Для получения и использования данных о транспортной обстановке необходимо опираться, наряду с фиксируемыми фактами, касающимися движения транспортных средств на контролируемых участках в течение последнего времени, использовать также закономерности, которые могут быть получены из массива наблюдений за длительное время.

Следует заметить, что в последние десятилетия выдвигались и отчасти практически использовались (начиная с британской системы SCOOT — Split Cycle Offset Optimisation Techniqu [1]) различные подходы к управлению транспортными потоками, учитывающие вероятностную природу транспортных потоков [2, 3] или ориентирующиеся на использование данных о текущей транспортной обстановке [4–6], в том числе предполагающие прямое управление транспортными средствами на качественном уровне (разделение последовательностей ТС на группы [7]). Однако первые предполагают стационарность случайных потоков входящих ТС, что существенно ограничивает область их применения. Методы [4–7] также не обладают универсальной применимостью, что

побуждает искать другие подходы, в том числе основанные на принципах автоматического управления [8, 9].

Для оценивания состояния локальных транспортных потоков и выработки адекватного адаптивного светофорного регулирования недостаточно использовать лишь интегральные показатели, такие как длины очередей перед входными стоп-линиями между выделенными моментами времени (моментами переключения светофоров). Наиболее важной характеристикой проезда перекрестка по определенному направлению является средняя временная задержка при проезде перекрестка. Такие величины определяются через моменты, в которые отдельные транспортные средства пересекают стоп-линии и некоторые другие выделенные рубежи. Современные технические и программные средства позволяют устанавливать в реальном времени эти моменты для всех проезжающих автомобилей [10–13]. С их помощью восстанавливаются дискретные траектории, определяемые как моменты проезда всех таких рубежей, для этих автомобилей. При этом не требуется устанавливать индивидуальные свойства этих ТС, достаточно характеризовать каждый из них порядковым номером в последовательности ТС, проезжающих по своему маршруту.

На основе использования такой информации за ближайший предшествующий промежуток времени надлежащей продолжительности могут быть реализованы методы адаптивного регулирования, основанных на принципе автоматического управления, как это было сформулировано и продемонстрировано в [8, 9]. Эти методы (режимы регулирования) различаются не только по качественным характеристикам — какой именно показатель эффективности прохождения транспортного потока в них используется. Они различаются также количественными параметрами. Предположительно оптимальный режим может быть определен в зависимости от типа транспортной ситуации на основе априорных рекомендаций, полученных путем обработки ранее наблюдавшихся случаев и соответствующих расчетов. Наряду с этим перспективным, но непростым в реализации является адаптация режима регулирования к динамике локального транспортного потока в течение текущего дня и более коротких периодов.

Анализ и обоснование эффективности предлагаемых подходов не могут быть выполнены путем натуральных экспериментов. Это связано только со значительными организационными и юридическими затруднениями и возможностью ухудшения транспортной ситуации при неудачных экспериментах. Дело также в том, что в силу случайного характера дорожного движения невозможно практически получить представительное множество возможных ситуаций. В итоге, с учетом многообразия их характеристик, по фактически осуществившемуся их набору неизбежно будут получены оценки, смещенные в ту или иную сторону, а весь разброс возможных результатов может быть определен лишь очень грубо.

В связи со сказанным изучаются способы проведения вычислительных экспериментов для решения вышеописанной задачи анализа и обоснования режимов регулирования. Нужно подчеркнуть, что исходная информация для их проведения, напротив, в современных условиях регистрируется в массовых объемах, в особенности путем видеонаблюдения. При наличии гарантий, что получаемые данные не включают какой-либо персональной информации об автомобилях, движение которых отслеживается, не приходится ожидать препятствий для их использования. К тому же необходимые данные касаются элементарных факторов и не требуют отслеживания движения отдельных ТС в широких масштабах. Информационная поддержка решаемой задачи также рассматривается в докладе.

Настоящая работа, как и предыдущие работы авторов [8, 9, 17–19], 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. Структуры перекрестков и организация движения на них. Связь с характеристиками локальных транспортных ситуаций**

Транспортную обстановку на участке городской дорожной сети характеризуют количественные показатели транспортных потоков на всевозможных направлениях ее проезда и их динамика. Применительно к перекрестку эти направления суть возможные маршруты проезда перекрестка. Последние могут детализироваться до уровня дорожных полос, по которым они проходят. В другом контексте параллельные полосы могут рассматриваться как единое целое. Система маршрутов характеризуется не только связями между входными и выходными дорогами, но и взаимосвязями между проездом по разным маршрутам в связи с их пересечениями, слияниями и разветвлениями.

Детальная структура перекрестка представляется ориентированным графом, дуги (ребра) которого соответствуют участкам дорожных полос, границами которых являются выделенные точки — входы и выходы перекрестка, входные и, возможно, внутренние стоп-линии, точки (места) пересечения, слияния и разветвления полос. Эти выделенные точки представляются вершинами графа и служат узлами маршрутов. Для того чтобы отразить систему маршрутов, требуется для каждой вершины, соответствующей точке пересечения, указать, какой входной дуге соответствует каждая выходная дуга. В точке слияния маршрутов происходит переход с каждой из входных дуг на единственную выходную. В точке разветвления происходит переход с единственной входной дуги на выходные дуги, каждая из которых определяет свой маршрут. Рассмотрение большого количества перекрестков показывает, что точки разветвления при их наличии находятся ближе к началам маршрутов, чем точки слияния.

Система маршрутов определяет и набор переменных, характеризующих транспортную ситуацию. Первичными данными являются количества ТС, проезжающих по каждому маршруту в течение заданных временных интервалов, соответствующих отдельным светофорным циклам. Но они меняются от цикла к циклу для каждого маршрута. Эти изменения складываются из двух элементов — трендов средних показателей и отклонений от трендов.

В случае разветвляющихся маршрутов определяются доли ТС, проехавших по каждой ветви. Эти доли меняются от цикла к циклу, колеблясь относительно средних значений, которые, собственно, и являются объективной характеристикой текущей локальной транспортной ситуации.

Структуры перекрестков, т.е. системы путей их проезда их взаимное расположение, чрезвычайно разнообразны по сравнению с ограниченным набором регулярных структур, которые обычно рассматриваются в научной и технической литературе [2, 14–16]. Пути движения на перекрестке и на прилегающих участках дорог, как и на городских улицах вообще, организованы в виде системы дорожных полос. В соответствии с назначением перекрестка некоторые полосы пересекаются с другими. Типично также наличие слияния некоторых полос, а также их разветвления. На входах перекрестка расположены внешние стоп-линии, а на сложных перекрестках имеются также внутренние стоп-линии. На каждом разрешенном маршруте проезда области перекрестка имеется хотя бы одна из «точек» (мест) перечисленных типов, т.е. стоп-линий и конфликтных точек пересечения, слияния и разветвления. Этот факт иллюстрирует структура перекрестка, построенная по типу перекрестков на Профсоюзной улице в Москве (рис. 1).

В целях безопасности маршруты проезда регулируемого перекрестка разделяются между фазами светофорного цикла, образуя схемы проезда на отдельных фазах, в совокупности составляющие схему пофазного разъезда (СПР). Ввиду того, что одновременный проезд по пересекающимся маршрутам создает значительную опасность, он не допускается для всех однофазных схем (рис.2). Одновременное слияние потоков, достигающих точку пересечения по разным дорожным полосам, несущее опасность из-за конкуренции за порядок проезда конфликтной точки, в большинстве случаев исключается из СПР. Такие конфликтные точки становятся *неактивными* для конкретной СПР, т.е. проезжаемыми по единственному маршруту на всех фазах. Тем не менее, неактивная конфликтная точка может случайным образом временно активизироваться в началах некоторых фаз, если ТС с предыдущего направления не завершили ее проезд к тому моменту, когда ее может достигнуть первое ТС с нового направления.

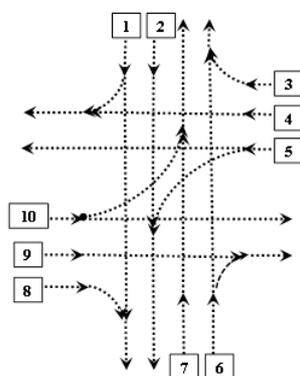


Рис. 1. Система разрешенных маршрутов движения через перекресток

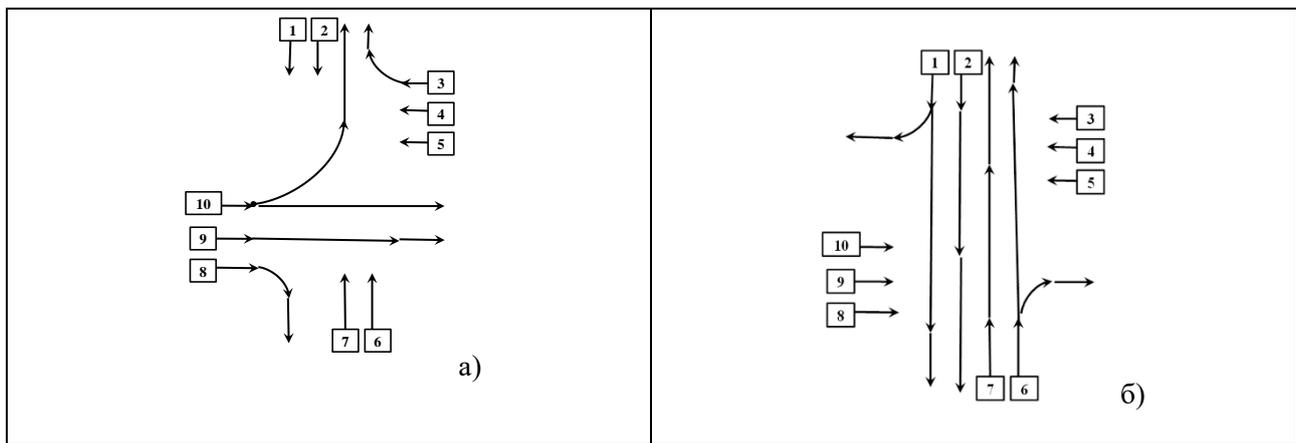


Рис. 2. Схемы проезда для 1-й (а) и 2-й (б) фазы светофорного цикла

## 2. Пространственно-временная структура транспортного потока. Закономерности и взаимосвязи в динамике кластеров

Разделение любого маршрута проезда области перекрестка на части стоп-линиями, активными и, возможно, активизируемыми конфликтными точками, а также переключения светофоров создают особый характер дорожного движения. Во-первых, на каждом участке присутствует небольшое количество транспортных средств, поэтому результат их различий в движении, вызванный индивидуальными особенностями автомобилей и водителей, не поддается нивелированию и случайный разброс скоростей потоков по маршруту значителен. Во-вторых, типичной ситуацией для потоков высокой и средней интенсивности является образование в течение красных фаз очередей из неподвижных автомобилей перед стоп-линиями. Такие цепочки ТС после переключения светофора не движутся свободно, а начинают *связанное движение* с минимальными безопасными промежутками между последовательными ТС. Такие цепочки принято называть *кластерами*. К ним могут присоединяться с сохранением связанного движения и ТС, прибывающие к входу маршрута в течение зеленой фазы. Кластеры, образуемые в результате регулирования на близлежащих перекрестках или пешеходных переходах, могут составлять часть потоков до входов перекрестка. В точках разветвления и активных точках слияния кластеры преобразуются.

При проезде перекрестка возникают следующие ситуации:

- Происходит прибытие на вход и последующее движение, описываемое ниже, свободных ТС, имеющих на входе желательную для себя скорость, или кластеров, головные ТС которых движутся как свободные ТС.
- Движение по маршруту проезда перекрестка, как правило, осуществляют ТС в составе кластера, образовавшегося из стоячей очереди перед стоп-линией. К этому кластеру могут присоединяться на маршруте другие ТС, прибывшие на вход маршрута до окончания текущей зеленой фазы, как свободные, так и в составе движущихся кластеров. Транспортное средство, пересекшее стоп-линию как свободно движущееся, преследует своего лидера либо оставаясь свободным, либо в некоторый момент времени соединяясь со своим лидером в один кластер. Движение последовательности ТС в таком составе происходит либо до точки разветвления маршрута при ее наличии, либо до присоединения к предыдущему кластеру в точке слияния или на выходной дороге, либо до выезда на выходную дорогу. В случае наличия на маршруте активной точки слияния последовательности ТС, двигающиеся по сливающимся маршрутам, перемешиваются, образуя после этой точки новую последовательность.
- Пришедший в движение с включением зеленой фазы кластер разрывается перед моментом окончания зеленой фазы. Хвостовым ТС кластера становится последнее ТС, успевшее до того момента пересечь входную стоп-линию. Если кластер успел полностью проехать стоп-линию, то первое из последующих ТС, которое не может успеть пересечь стоп-линию до окончания зеленой фазы, останавливается перед стоп линией, а за ним и последующие до начала следующей зеленой фазы, тем самым образуется новый кластер из неподвижных ТС.
- Если на маршруте имеется временно активизированная точка пересечения, которая не успевает освободиться к моменту ее достижения первым ТС на маршруте при его свободном движении, данное ТС и следующие за ним *задерживают* свое движение. Такая задержка зависит от

временного промежутка между началом зеленой фазы и моментом освобождения конфликтной точки.

- Если на маршруте имеется временно активизируемая точка слияния, то, в зависимости от времени ее освобождения, приближающийся к ней кластер или свободное ТС либо замедляет движение и присоединяется к предыдущему в момент ее освобождения, либо начинает проезд точки слияния позже и присоединяется к предшествующему на остальной части маршрута, либо выезжает по маршруту за границы перекрестка без слияния с предыдущим.
- При проезде точки разветвления либо ТС-преследователь выезжает на ту же ветвь, что и предшествующий и тогда присоединяется к кластеру своего лидера, либо, иначе, начинает проезд своей ветви в состоянии свободного движения. Если по той или иной причине — в силу собственных параметров или замедления перед конфликтной точкой — предыдущее свободное ТС после точки разветвления движется медленнее, чем ее лидер, то оно до конца маршрута может успеть образовать с ним один кластер.
- При проезде активной точки слияния свободно движущиеся ТС или кластеры с каждой ветви должны проезжать ее в том же порядке, в котором они проезжали бы ее, если бы двигались по маршруту независимо от движения по другой ветви. При отсутствии конкурентов за порядок проезда с другой ветви последовательность независимых ТС или кластер проезжают точку слияния без изменения в своем движении. Иначе автомобили с разных входящих ветвей проезжают точку слияния и присоединяются к кластеру после точки слияния в указанном порядке.

Перечисленные варианты динамики пространственно-временной структуры транспортного потока в области перекрестка исчерпывают все возможные ситуации.

### **3. Определение показателей движения по маршрутам отдельных автомобилей и целых кластеров на основе оперативной обработки данных мониторинга дорожного движения**

Для прогнозирования развития транспортной ситуации на участке ГДС и управления ею необходимо, прежде всего, иметь точную информацию о ее динамике. К такой информации относятся: 1) количество транспортных средств на каждом участке дорожной сети в любой момент времени; 2) количество транспортных средств, переехавших с одного участка на другой за выбранные промежутки времени; 3) коэффициенты разделения потоков между направлениями в точках разветвления маршрутов. Как будет видно ниже, данные первого типа могут быть установлены для любого момента времени, а, следовательно, данные второго типа — для любого интервала времени. При этом их практическое использование предполагается только для выбранных моментов времени — как правило, моментов событий, значимых для динамики транспортных потоков — и временных интервалов между такими событиями. Что касается коэффициентов разделения потоков, то их точные значения не наблюдаются и получение приближенных оценок для практического использования требует выбора компромиссной длительности интервала, из которого они определяются: он должен быть достаточно длительным, чтобы ошибка в определении средних пропорций направлений быть приемлемыми и достаточно короткими, чтобы можно было ожидать, что изменение этих долей с течением времени не будет значительным по сравнению с ошибкой в их определении. Все сказанное относится и к распределению входящих потоков между внутрирайонными корреспонденциями. Другие типы получаемой информации обсуждаются ниже.

Основными фиксируемыми первичными фактами, на основании которых можно определить все перечисленные производные данные, являются моменты пересечения отдельными транспортными средствами заданных границ. Если на участке ГДС все подобные события фиксируются на всех границах, включая границы участка, определенные на всех въездных и выездных дорогах, то без получения каких-либо персонализированных данных о транспортных средствах, проезжавших через этот участок в рассматриваемый период, тем не менее, можно установить траекторию движения каждого транспортного средства, появляющегося на въезде, через весь участок (при условии, что оно не завершает и не прекращает свое движение внутри участка). Для одного конкретного сложного перекрестка искомые границы показаны на рис. 3.

В общем случае, чтобы отслеживать процесс проезда перекрестка в реальном времени, необходимо размещать точки наблюдения в местах, соответствующих вершинам графа маршрутов, или вблизи них, исходя из следующих требований: по отношению к въездам перекрестка границы на полосах движения определяются условно, для стоп-линий — непосредственно на них, для точек пересечения и

разветвления — на дорожных полосах после этих точек, а для точек слияния — перед такими точками на обеих объединяющихся полосах движения.



Рис. 3. Структура сложного перекрестка на Серпуховской площади и требуемые рубежи для мониторинга транспортного потока

При движении через зону перекрестка состав потока и порядок движения транспортных средств по участкам полос — дугам сети — не изменяются, что позволяет определить путь каждого транспортного средства, проходящего через зону перекрестка, и его временные параметры. Опишем процедуру его расчета. Каждое событие перехода одного транспортного средства с одной дуги на другую наблюдается непосредственно, т.е. для него устанавливается момент события и между какими дугами произошел переход. Обозначим  $S$  множество всех событий перехода между дугами, а также входа на начальные дуги и выхода с конечных дуг. Будем считать, что они занумерованы в хронологическом порядке, а сами их моменты будем обозначать  $t_{PASS}(s)$ ,  $s \in S$ . Обозначим подмножества событий перехода через вершину  $k$   $S_1(k)$ , с дуги  $i$  на дугу  $j$  —  $S_2(i, j)$ ; для входа в зону перекрестка на дугу  $j$  и для выхода через дугу  $i$  используются аналогичные обозначения, соответственно,  $S_2(0, j)$  и  $S_2(i, 0)$ .

Вся последовательность ТС, когда-либо проезжавших по  $j$ -й дуге, нумеруется в порядке ее проезда. События делят рассматриваемый период на этапы, в течение которых не изменяются наборы ТС, находящихся на определенных дугах.

При сепарации между направлениями по полосам можно определить, какие по счёту из автомобилей, вошедших на полосу, пересекают стоп-линию на конкретной фазе, т.е. порядковые номера первого и последнего из них.

Более тонкие показатели связаны с прохождением точек пересечения и слияния. Устанавливаются моменты освобождения одним кластером и захвата следующим точек пересечения и слияния. Наличие промежутка говорит о возможности с пользой увеличить продолжительность зелёной фазы для второго кластера. Чем меньше доля случаев с наличием такого промежутка, тем сомнительнее увеличение продолжительности второй фазы. Другое явление — экстраординарное увеличение времени проезда по маршруту

Для выбора априорных рекомендаций необходимо выполнить классификацию транспортных ситуаций по признакам — характеру распределения входящих потоков между направлениями, трендов интенсивности поступления и соотношения трендов по направлениям.

#### 4. Возможные способы использования данных о текущей локальной транспортной обстановке для адаптивного регулирования движения на перекрёстке

Если исключить случай организации зеленой волны, требующей особых условий [14, 16], то значительная часть транспортных средств испытывает задержки при проезде регулируемого перекрестка. Большинство таких задержек происходит в очередях перед стоп-линиями на въезде, задержки перед конфликтными точками встречаются гораздо реже. Поэтому длина такой очереди, измеряемая количеством транспортных средств, стоящих перед определенным въездом на перекресток, является показателем задержки на этом въезде. Для его определения достаточно определить порядковые номера последнего пришедшего и последнего пересекшего стоп-линию автомобиля на соответствующем маршруте.

Среднее значение таких задержек по отдельным последовательностям транспортных средств, которые начинают движение за следующий светофорный цикл от определенного въезда за

характерные времена, является показателем эффективности пропускной способности этого въезда, так же как и длина очереди.

Наконец, важным показателем эффективности организации дорожного движения является интервал времени между пересечением последней стоп-линии в определенном направлении на текущей зеленой фазе и окончанием этой фазы. Он указывает на избыточность продолжительности фазы и необходимость ее сокращения.

Адаптивное управление светофорами рассматривается уже давно, однако предложенные методы выбора моментов времени переключения работают преимущественно в случае потоков малой интенсивности, когда можно предотвратить образование очередей. В [8, 9] рассмотрены возможности использования методов адаптивного управления, основанных на применении принципов автоматического управления. Для их использования необходимо выбрать показатель эффективности прохождения потоков через перекресток, реализующий транспортную потребность во всех направлениях. В качестве таких показателей для конкретного направления мы рассматривали 1) абсолютную длину очереди в начале зеленой фазы, измеряемую количеством транспортных средств перед стоп-линией; 2) относительную длину очереди, т.е. ее отношение к числу транспортных средств, проезжающих перекресток в среднем за один светофорный цикл, и, наконец, 3) среднюю задержку проезда транспортных средств, проезжающих перекресток в течение последнего цикла или за несколько последних циклов.

Необходимо подчеркнуть, что это именно те показатели, которые рассчитываются на основе установления путей и их временных параметров для всех транспортных средств в зоне перекрестка, как описано выше.

В связи с тем, что каждая фаза светофорного цикла обслуживает несколько направлений, из таких показателей для каждого направления необходимо сформировать комплексный показатель, такой как их сумма или максимальное значение. Каждый метод представляет собой метод ожидаемого выравнивания значений выбранного показателя между направлениями путем изменения длительности фаз светофорного цикла.

Установление усредненных оптимальных значений продолжительности фазы в условиях случайного характера прибытия транспортного средства на въезды и проезда перекрестка не только затруднительно, но и не отвечает целям адаптивного управления в реальном времени. Грубая оценка оптимальной продолжительности  $j$ -й фазы (если известны значения отдельных показателей  $r_i$ ) равна

$$T_{P\text{ OPT }j} = T_{TLC0} r_j / \sum_{i=1}^{N_P} r_i$$

Здесь  $T_{TLC0}$  — заданная общая продолжительность зеленых фаз в цикле работы светофора. Можно постепенно приближаться к предположительным оптимальным значениям с разными скоростями от одного цикла ( $T_{OLDj}$ ) к следующему ( $T_{NEWj}$ ), предполагая

$$T_{NEWj} = T_{OLDj} + K \times (T_{OPTj} - T_{OLDj})$$

где коэффициент  $K$  — параметр метода управления.

Априорный выбор методов (режимов) светофорного регулирования на основе исторических данных может служить отправной точкой для адаптивного регулирования.

*Адаптация светофорного регулирования к данным о текущей дорожной обстановке и ее динамике*

## **5. Организация компьютерного исследования режимов регулирования трафика на перекрестке и пример ее применения**

Практическая реализация методов адаптивного регулирования требует решения ряда организационных и правовых вопросов, из которых в данной работе рассматривается вопрос создания постоянно действующей системы регистрации и оперативной обработки данных о движении транспортных средств. Однако даже в случае практической реализации одного или группы таких методов возможности обоснования эффектов их применения и преимуществ одних методов перед другими путем обобщения собранных эмпирических данных на приобретенный опыт ограничены. Причиной этого является недостаточная репрезентативность реально наблюдаемых условий по отношению ко всем возможным условиям в будущем из-за отмеченного существенного влияния и разнообразия случайных факторов. Поэтому основным средством обоснования эффектов таких методов является компьютерное моделирование, основанное на знании взаимосвязей в дорожном движении. Двумя основными факторами стохастического характера транспортных потоков на перекрестке является, во-первых, случайное чередование в потоке транспортных единиц с различными

характеристиками, определяющими их динамику, а с другой, — случайное чередование ТС с разными направлениями проезда перекрестка. При этом распределение в потоке разных типов VDU, как и распределение потоков по корреспонденциям статистически устойчиво.

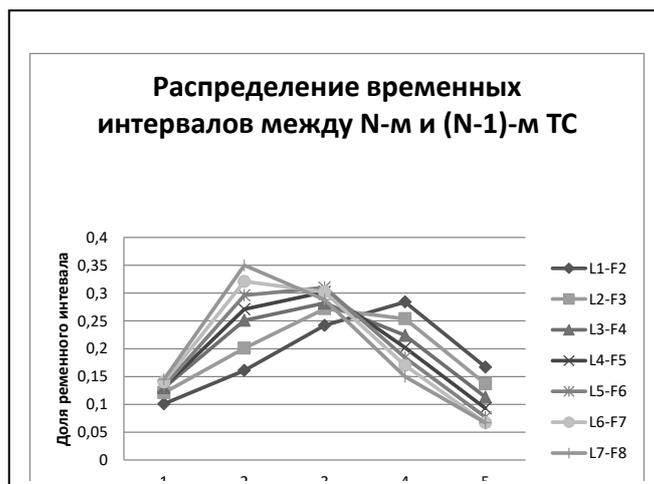


Рис. 4. Статистическое распределение интервалов времени между транспортными средствами

Эмпирическое изучение транспортных потоков путем отслеживания траекторий отдельных транспортных средств в потоке [20] показывает наличие в потоке многих типов транспортных единиц (VDU — “vehicle-driver unit”) в составе автомобиля и водителя (для Москвы авторы выделяют от 13 до 16 типов). С другой стороны, во множестве этих типов наблюдается определенная упорядоченность: Те VDU, которые быстрее разгоняются, быстрее и тормозят, для них безопасное расстояние меньше по всему диапазону скоростей и скорость свободного движения также выше. Обработка данных наблюдений позволяет выявить ряд статистических зависимостей, на которых и должно основываться моделирование дорожного движения в рассматриваемых условиях. Сказанное выше позволяет единообразно интерпретировать эти зависимости. Разброс значений измеряемой переменной при определенных значениях величин, от которых она зависит, связан с тем, что ее значение зависит от типа VDU, а эти типы определенным образом распределены в потоке. Формально свяжем с типом VDU значение скалярного параметра, принимающим значения  $p \in [0, 1]$ . Будем считать, что если переменная  $z$ , при векторе параметров  $A$  принимает значения в диапазоне  $[z_{\min}(A), z_{\max}(A)]$  соответствии с функцией распределения  $F(z; A)$ , то для VDU типа  $p^*$  эта переменная примет значение  $z^*$ , для которого

$$F(z^*; A) = p^*.$$

Принципиальная конструкция модели состоит в следующем. Модель воспроизводит транспортный поток через перекресток, формирующийся при определенных интегральных характеристиках входных потоков и заданных пропорциях их распределения между направлениями и при заданных параметрах регулирования, как случайный процесс. Каждая реализация этого случайного процесса определяется как детерминированный процесс появления на входах перекрестка последовательностей ТС, образованных из свободных ТС и (или) кластеров ТС, с последующим проездом области перекрестка в течение заданного периода. Детерминированный характер проезда перекрестка обеспечивается фиксированными значениями параметра  $p$  для всех входящих ТС, а также заданными для них направлениями проезда в точках ветвления при их наличии на маршрутах. Вероятностный характер дорожного движения в модели обеспечивается тем, что генеральная совокупность реализаций процесса при заданном составе входных последовательностей в отношении количества входящих ТС, моментов их появления и принадлежности к входным кластерам определяется всевозможными значениями параметра  $p$  для всех входящих ТС, независимо равномерно распределенных на интервале  $[0, 1]$ , и независимым определением направления проезда в точках ветвления с заданными вероятностями этих направлений. В свою очередь, определение генеральной совокупности входных последовательностей основано на том же принципе.

Практически применимый способ моделирования состоит в многократной генерации входных последовательностей на основе установленных статистических закономерностей и многократном расчете реализаций дорожного движения на модели для каждой из сгенерированных входных последовательностей. Для каждой входной последовательности производится независимая генерация для всех участников дорожного движения при их появлении на входе их индивидуальных значений  $p$ ,

в соответствии с равномерным распределением на интервале  $[0, 1]$ , а также, когда требуется, направления проезда в точках ветвления на основе заданными вероятностями этих направлений. Таким образом, при достаточно большом количестве реализаций расчетного транспортного потока для каждой переменной, характеризующей его динамику в дискретно-событийном представлении, будет получено хорошее приближение к статистическому распределению такой переменной. Некоторый набор таких переменных или вычисленных на их основе величин, определенный на основе их практической значимости, дает требуемую характеристику процесса проезда перекрестка,

Для того чтобы воспроизвести транспортный поток в определенной типичной ситуации необходимо, кроме использования статистических зависимостей, применимых к данной ситуации, также корректно воспроизвести входной поток как набор кластеров и отдельных ТС, появление которых на входе статистически соответствует реальности.

Для проведения достаточного количества вычислительных экспериментов такого рода необходимо на протяжении ряда светофорных циклов воспроизвести значительное количество реализаций процесса случайного движения, в которых выбранные для сравнения методы управления используются для управления прохождением транспортных средств через перекресток. Для наиболее полной сопоставимости результатов расчета для разных методов необходимо использовать для всех них одни и те же псевдослучайные последовательности ТС во входных потоках для всех направлений.

В качестве примера реализации такой методики анализа воздействия различных методов управления были проведены расчеты для 10 реализаций случайного прохождения Т-образного перекрестка, структура которого представлена на рис. 5.

При этом сравнивались четыре метода управления: 1) постоянная оптимальная длительность фазы (Const); 2) максимальная длина очереди по направлениям текущей фазы в начале фазы (MQL); 3) общая длина очереди транспортных единиц по направлениям текущей фазы (определяется в начале фазы) (SQL); 4) общее время задержки транспортных средств, проезжающих перекресток на текущем этапе (WT). Нужно подчеркнуть, что регулирование по методу Const требовало знания средних интенсивностей транспортных потоков по всем направлениям, которые не могут быть точно определены по данным текущих наблюдений, поэтому оно использовано для сравнения только в методических целях.

Разброс характеристик входных потоков для разных сгенерированных реализаций входящих потоков показан в Таблице 1.

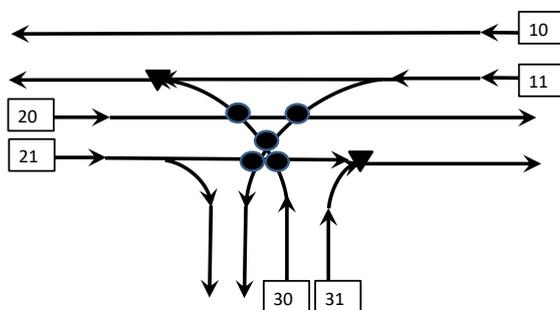


Рис. 5. Система маршрутов и конфликтные точки

Таблица 1. Количество транспортных средств, подъехавших к въездам на перекрёсток во время некоторых групп светофорных циклов

Циклы	Входы									
	10					11	20	21	30	31
	Реализации									
	1	3	6	9	10	1	1	1	1	1
1–5	41	27	37	30	30	58	35	20	32	39
6–10	28	29	30	32	31	60	43	23	31	36
11–15	32	33	33	32	25	54	40	21	26	39
16–20	33	34	24	38	33	44	41	21	23	37
20–25	33	31	32	41	29	53	40	19	36	37
25–30	34	38	34	30	34	52	35	19	34	40

В таблицах 2 и 3 приведены средние значения общих показателей применения методов регулирования в рассматриваемом примере, рассчитанные по совокупности реализаций. В первом из них показаны средние показатели по совокупности входов, т.е. по всему потоку, а во втором —

максимальные по входам. Видно, что автоматическое управление разными методами в данном случае не привело к уменьшению общих параметров задержки, но уменьшило задержки на наиболее загруженных направлениях, что может быть не менее важной целью. Этот эффект проявился для всех методов управления, но наиболее существенно для метода SQL, т.е. при принятии в качестве целевого показателя общей длины очереди транспортных единиц по направлениям текущей фазы.

Таблица 2. Средние показатели по совокупности входов в вычислительных экспериментах для методов регулирования

Метод регулирования	Средняя очередь	Макс. очередь	Средняя задержка одного ТС, с.	Макс. задержка одного ТС, с.	Мин. задержка одного ТС, с.
Const	23,31	44,20	149,40	291,50	39,52
MQL	25,62	49,83	186,24	398,61	21,68
SQL	24,12	44,73	168,09	318,67	44,88
WT	25,62	50,75	187,66	422,27	18,52

Таблица 3. Максимальные значения показателей эффективности для всех входов в вычислительных экспериментах по методам управления

Метод регулирования	Средняя очередь	Макс. очередь	Средняя задержка одного ТС, с.	Макс. задержка одного ТС, с.	Мин. задержка одного ТС, с.
Const	67,66	125,90	392,73	737,46	147,56
MQL	59,60	99,90	350,01	724,55	52,17
SQL	53,39	90,50	323,66	561,19	133,49
WT	59,62	102,80	347,60	779,56	49,66

Формулировка методов управления и проведенные для их обоснования вычислительные эксперименты имели ряд упрощений. Для их преодоления требуется получить и использовать дополнительную информацию, рассмотренную в этой статье. Во-первых, рационально определенные интервалы безопасного времени между фазами не могут гарантировать отсутствие задержек перед точками пересечения и слияния во всех циклах. Средний эффект таких задержек можно снизить в разумных пределах, т.е. по сравнению с эффектом от снижения используемой пропускной способности перекрестка за счет сокращения периодов движения транспортных потоков по направлениям. Возможные значения таких задержек и их средние значения можно точно определить с помощью введенных статистических распределений.

## 6. Заключение

Дорожное движение в городе испытывает воздействие множества случайных факторов. Это вызывает значительные затруднения для выработки эффективного управления им. В особенности это относится к регулируемым перекресткам городских магистралей, через которые проходит основной объем городского трафика. Но структурно-параметрическое управление дорожным движением как раз и осуществляется на перекрестках: на структурном уровне — путем установления количества фаз светофорного цикла, схем проезда на каждой и их последовательности в цикле, на параметрическом — путем определения продолжительности фаз светофорного цикла.

Случайные колебания интенсивности транспортных потоков и их закономерные тренды не позволяют эффективно управлять ими на основе заранее установленных программ. Адаптивное регулирование принципиально имеет значительные преимущества перед программным. Но для его осуществления необходимо постоянно получать и оперативно обрабатывать детальную информацию о текущей локальной дорожной обстановке.

Современные технические и инфокоммуникационные средства мониторинга транспортных потоков создают необходимую базу для получения первичной информации о дорожной обстановке. В настоящей работе показано, каким образом на ее основе могут оперативно определяться и затем использоваться для адаптивного регулирования переменные, характеризующие дорожную обстановку, как относящиеся к движению отдельных транспортных средств, так и интегральные показатели дорожного движения по направлениям проезда перекрестка.

Показано, как использование получаемой таким образом информации открывает перспективы применения методов автоматического управления при светофорном регулировании в целях более полного использования ресурсов дорожной сети и уменьшения задержек в движении транспортных средств. Представлены вычислительные аспекты имитационного моделирования дорожного движения на перекрестке с учетом пространственно-временной структуры транспортных потоков. С их учетом может быть развит опыт выбора и обоснования способов светофорного регулирования. На этой основе может быть проведено комплексное исследование различных возможностей структурно-параметрического управления перекрестком и выработка рекомендаций по его осуществлению для конкретных условий.

## Литература

1. *Bretherton D.* The “SCOOT” Urban Traffic Signal Control System // Traffic Advisory Leaflet. The Department of the Environment, Transport and the Regions. London, The United Kingdom. – 1999.
2. *Живоглядов В.Г.* Теория движения транспортных и пешеходных потоков. Ростов н/Д: Известия вузов Сев.-Кавк. региона, 2005. – 1082 с.
3. *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.
4. *Kurzanskiy A. A., Varaiya P.* Active traffic management on road networks: a macroscopic approach // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2010. Vol. 368, N 1928. – P. 4607-4626,
5. *Zhou B. et al.* Adaptive traffic light control in wireless sensor network-based intelligent transportation system // 2010 IEEE 72<sup>nd</sup> Vehicular technology conference-Fall. – IEEE, 2010. – P. 1-5.
6. *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, N 1. – P. 1-11.
7. *Cheng J. et al.* Fuzzy group-based intersection control via vehicular networks for smart transportations // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2016. – Vol. 13, N 2. – P. 751-758.
8. *Соловьёв А.А., Валуев А.М.* Новый подход к применению методов автоматического управления к регулируемым перекресткам городских автодорог // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD’2023): труды Шестнадцатой международной конференции, 26–28 сентября 2023 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, 2023. – С. 1030-1040.
9. *Solovyev A.A., Valuev A.M.* Automatic Control Methods as the Basis for the Development of Intelligent Urban Traffic Control Systems // 2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). – IEEE Xplore Digital Library, 2023, – Art. 10332667. – P. 1-5.
10. *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.
11. *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. 03023.
12. *Чебыкин И.А., Семенов С.С.* Автоматизация мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2020. – №4. – С. 52-60.
13. *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.
14. *Signalized Intersections: Informational Guide.* Publication Number: FHWA-HRT-04-091. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation/ Federal Highway Administration, 2004.
15. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. – 69 с.
16. *MnDOT Traffic Signal Timing and Coordination Manual.* – Minnesota Department of Transportation, 2017. – P. 211
17. 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.
18. *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. – Art. 910983. – P. 1-5.
19. *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.
20. *Yashina M.V., Tatashev A.G., Dotkulova A.S., Susoev N.P.* Accounting psycho-physiological types of drivers in the deterministic-stochastic traffic model // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – IEEE, 2019. – P. 1-4.