

# ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА СЛОЖНОМ ПЕРЕКРЕСТКЕ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА<sup>1</sup>

Соловьев А.А., Валуев А.М.

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

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

*Аннотация. На пересечении многих дорог эффективная организация безопасного движения достигается некоторым разбиением его на несколько регулируемых перекрестков. Для такого пересечения рассматривается проблема оптимизации светофорного регулирования с учетом динамики образующихся очередей. Представлены вопросы информационного обеспечения, получения и использования статистических характеристик транспортных потоков.*

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

## Введение

Организация дорожного движения на сопряжениях многих дорог, решает две задачи: 1) обеспечение проезда по многим направлениям и 2) эффективное и безопасное разделение конфликтующих транспортных потоков во времени. Последнее требует сбалансировать возможности проезда по разным направлениям, что становится труднодостижимым при разделении единого для перекрестка светофорного цикла на много фаз. Даже при пересечении двух магистралей с двухсторонним движением для безопасного сопряжения всех направления движения нужно использовать четырехфазный светофорный цикл, что нежелательно и практически всегда не обеспечивает эффективного пропуска потоков по всем направлениям. Поэтому рациональное устройство перекрестка включает сложные маршруты с дополнительными поворотами и даже самопересечением, проезд которых разбивается на несколько этапов, которые разделяются остановками на внутренних стоп-линиях. В Москве такие перекрестки характерны для пересечений магистралей на Юго-Западе, застройка которого велась по единой программе, но дорожное строительство не предусматривало возведения дорожных сооружений для разведения потоков на разных уровнях. С другой стороны, на Садовом кольце создание ряда туннелей для основного транспортного потока не привело к значительному упрощению задачи организации движения на площадях над этими туннелями, что вызвано сложной исторически сложившейся дорожной структурой вокруг этих площадей.

Светофорное регулирование на сложных перекрестках с внутренними стоп-линиями осуществляется несколькими системами светофоров. Принципиально светофорный цикл каждой системы должен быть разделен на фазы таким образом, чтобы обеспечивать в среднем проезд через соответствующие стоп-линии по каждому обслуживаемому направлению среднего количества автомобилей, прибывающих на входы перекрестка в целях проезда по этому направлению. Ориентация именно на средние значения связана с тем, что как поступление на входы и текущее распределение поступающих ТС между направлениями, так и проезд перекрестка по отдельному направлению имеют случайный характер. Среди случайных факторов нужно отметить взаимосвязь между проездом транспортных средств по пересекающимся и, в особенности, по сливающимся направлениям. Она заключается в том, что последние автомобили последовательности, начавшей движение по некоторому маршруту от стоп-линии на определенной фазе светофорного цикла, могут на некоторое время блокировать движение по другому маршруту, пересекающемуся или соединяющемуся с первым. Такие явления многократно наблюдались и фиксировались авторами. Но для перекрестков без внутренних стоп-линий время задержки, как правило, невелико в сравнении с продолжительностями фаз, за исключением случая затрудненного движения на выходной дороге после точки слияния. Блокирующие автомобили не задерживаются в конфликтной точке. Если, напротив, блокирующая точка расположена на маршруте перед внутренней стоп-линией, то возможно образование после нее неподвижной очереди такой длины, что она захватывает и конфликтную точку. В этом случае разблокировка последней происходит уже после того, как включится зеленый свет и очередь придет в движение. В этом случае существенные задержки могут затрагивать не только те ТС, которые непосредственно ожидают

<sup>1</sup> Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0019

разблокировки конфликтной точки. На маршруте образуется очередь, к которой будут присоединяться автомобили, которые в период блокировки еще находятся на входной дороге. Эти обстоятельства должны в какой-то форме учитываться системой управления при выборе параметров светофорного регулирования и порядка следования однофазных схем проезда для групп светофоров, реализующих отдельные светофорные циклы.

Несмотря на то, что сложные, многосекционные перекрестки имеют широкое распространение и затрагивают даже важные магистрали мегаполисов, анализ и оптимизация дорожного движения на них не получили развития в научной и даже практической литературе [1–6]. В силу вышесказанного в таком вопросе должно быть уделено большое внимание вероятностной природе транспортных потоков, которая вообще очень важна для движения на перекрестках. Однако в монографиях и отдельных статьях, посвященных этому вопросу [1, 2, 7, 8] разнообразию структур перекрестков вообще и многосекционных перекрестков в особенности не уделено внимания. Соответственно предметом исследования не стало вытекающее из этого разнообразие процессов движения на отдельных участках, которое требует и соответствующего статистического моделирования.

Эффективное управление транспортными потоками, в том числе и на локальном уровне, требует получения больших объемов эмпирических данных о дорожном движении и их обработки, как для целей использования оперативной информации, так и для создания массивов исторических данных. Технические и инфокоммуникационные средства для этого получили в настоящее время значительное развитие [9–11]. В работе [12] рассматриваются некоторые способы получения данных обоих типов на основе мониторинга транспортных процессов. В [13] сформулированы выводы о типах водительского поведения, выявленные на основе слежения за дорожным движением на магистрали, что может иметь значение для его компьютерного воспроизведения.

Настоящая работа развивает выдвинутые авторами подходы к проблеме оптимизации управления перекрестком с многостадийным прохождением транспортных потоков [14], с учетом идеи комбинированного структурно-параметрического управления перекрестком [15–16] и опыта вероятностного моделирования локального дорожного движения [17].

## 1. Структура сложного перекрестка и организация движения на нем

Проезд перекрестка допускается по нескольким направлениям, соединяющим входные и выходные дороги и организованных в виде системы дорожных полос. Проезд по отдельному направлению осуществляется по одному или нескольким параллельным маршрутам, каждый из которых проходит по своей последовательности полос. Для перекрестка любой структуры характерно наличие пересечений и слияний направлений, которые в практических целях целесообразно рассматривать как точки пересечения и слияния осевых линий дорожных полос. При напряженном трафике нередко наблюдаются случаи, когда на конкретном светофорном цикле временно блокируется не все направление, а только один из составляющих его маршрутов.

Для простых перекрестков все его светофоры образуют одну систему, моменты их переключения разделяют светофорный цикл на несколько фаз (как правило, не больше трех) и межфазных интервалов безопасности. На сложном перекрестке, содержащем внутренние стоп-линии, имеется более одной системы светофоров, но продолжительность циклов для всех систем одинакова. Светофорное регулирование предназначено для минимизации конфликтов, в связи с чем схемы проезда на любой фазе каждого светофорного цикла не допускают проезда по пересекающимся маршрутам и по возможности исключают одновременный проезд по сливающимся маршрутам. Сложная структура перекрестка допускает наличие даже самопересекающихся маршрутов, как видно из помещенного ниже рис. 1. Однако в процессе проезда по такому маршруту происходит пересечение, по крайней мере, двух стоп-линий. При разделении схем проезда между фазами светофорных циклов для участков любых маршрутов, ограниченных стоп-линиями, действует то же условие минимизации конфликтности на структурном уровне.

Выбор управления движением на перекрестке при заданном наборе однофазных схем проезда (схеме пофазного разъезда) не ограничивается выбором продолжительности цикла и продолжительности фаз для каждой системы светофоров, а также временного сдвига между циклами, т.е. не сводится к параметрическому управлению. Помимо этого, требуется выбрать последовательность однофазных схем в циклах.

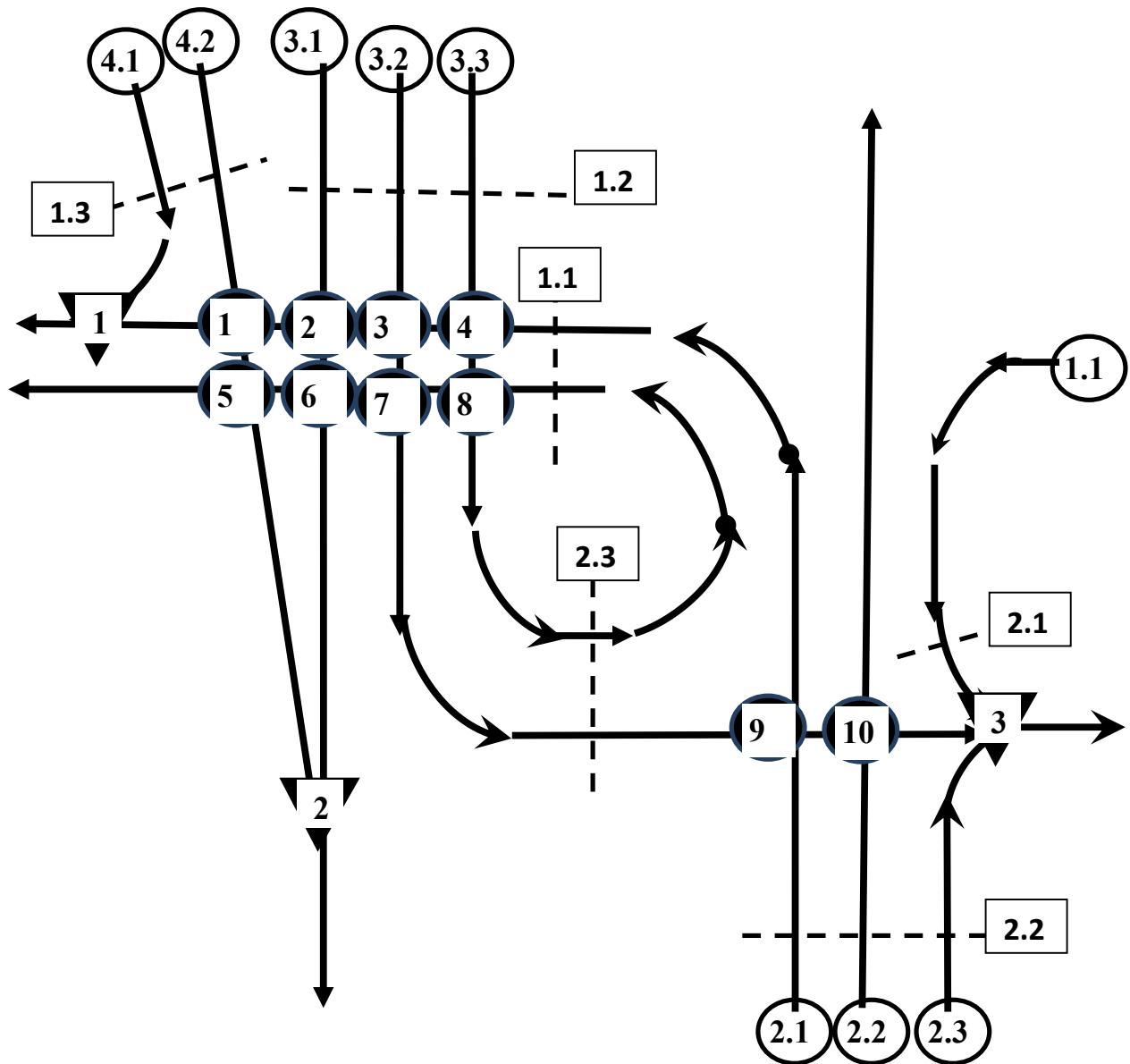


Рис. 1. Структура многосекционного перекрестка

На рис. 1 показана структура реального перекрестка в центре Москвы с некоторыми упрощениями. Въезд на западную секцию перекрестка регулируется первой системой светофоров, управляющих пересечением стоп-линий 1.1, 1.2 и 1.3, проездом стоп-линий 2.1, 2.2 и 2.3 на восточной стороне управляет вторая система светофоров. Маршруты проезда перекрестка существенно отличаются по своей сложности: путь от входа 2.2. пересекает лишь одну стоп-линию 2.2 и не соединяется с другими, от входа 3.3 – самопересекается и пересекает три стоп-линии, перед каждой из которых возможна остановка. Остальные маршруты соединяются с другими в точках слияния 1, 2 и 3. Из 10 точек пересечения маршрутов наиболее проблемной является девятая, поскольку проезд через нее от стоп-линий 2.3 может надолго блокироваться очередью за стоп-линией 1.1. Это пересечение реально существует, а отмеченная задержка неоднократно наблюдалась, причем частичное разрешение ситуации блокировки иногда осуществлялось путем попятного движения автомобиля, занявшего эту точку.

## 2. Факторы, определяющие динамику движения на перекрестке

Структурная и параметрическая оптимизация светофорного регулирования перекрестка применима для конкретной дорожной обстановки, характерной для данного перекрестка либо для определенного дня недели в определенное время суток, либо непосредственно фиксируемое в текущий промежуток времени.

Проезд перекрестка реализует локальный спрос на передвижения, который интегрально выражается в интенсивности движения по каждому направлению. Фактическое дорожное движение через перекресток как дискретный процесс случайного характера позволяет установить лишь приближенные оценки таких интенсивностей. Данные такого рода, усредненные за ряд однотипных периодов, относящихся к разным дням, рассматриваются как исторические данные. В принципе, они служат хорошим ориентиром для выбора достаточно эффективных постоянных параметров регулирования для таких временных интервалов. Более того, если параметры светофорного регулирования допускают оперативную коррекцию, то для выбора структурной составляющей управления такая возможность практически отсутствует, поэтому для него исторические данные по существу являются единственно возможным информационным источником. Заметим, что получение исторических данных не требует онлайн-обработки данных наблюдений и поэтому предъявляет менее жесткие требования к техническим и инфокоммуникационным средствам ее получения. Даже в недавнее время в профессиональной литературе описывалась чисто ручная обработка данных для этой и подобных целей [5].

Тем не менее, фактическая транспортная обстановка может значительно отличаться от типовой и к тому же нередко существенно изменяется в течение получаса и даже чаще. Использование современных средств мониторинга транспортных потоков позволяет обезличенно прослеживать движение всех транспортных средств в зоне перекрестка и тем самым в автоматическом режиме отслеживать динамику очередей, устанавливать время проезда по направлениям и, разумеется, оценивать интенсивности входящих потоков и их распределение по направлениям [12].

С другой стороны, устанавливая текущую транспортную ситуацию по перечисленным показателям, система управления еще не получает возможности прогнозировать ее развитие при определенном выборе управления. Для этой цели нужно установить закономерности локальной динамики транспортных потоков. Эти закономерности должны отражать особенности структуры и геометрии конкретного перекрестка, но являются по существу постоянными, зависящими лишь от характеристик условий дорожного движения в целом. К последним, в первую очередь, относится качественное состояние дорожного покрытия (сухое, влажное или покрытое слоем льда или снега).

Для обоснования конкретного набора статистических закономерностей, обеспечивающих возможность прогнозирования локальных характеристик дорожного движения, нужно рассмотреть транспортный процесс на перекрестке с разумной степенью детализации. В нем требуется выделить те его элементы, на которые оказывают непосредственное влияние интегральные характеристики входящих потоков и светофорное регулирование. Последнее определяет разделение изучаемого периода на отдельные промежутки времени, каждый из которых в системе управления рассматривается как единое целое – квант прохождения потока. Следует отметить, что может потребоваться рассматривать и некоторые события внутри этих промежутков времени, наступление которых существенно изменяют динамику потока.

Временное разделение порождает разделение последовательности автомобилей на каждом маршруте на отдельные группы. Поток на входе маршрута и сам по себе в любой момент времени имеет определенную пространственную структуру, т.е. либо является сплошным *кластером* связанного движения (в отечественной литературе используется термин «пачка»), или разбивается на такие кластеры, между которыми могут свободно двигаться отдельные автомобили. Разбиение входного потока на кластеры при отсутствии регулярности в их чередовании имеет второстепенное значение, зато образование и преобразование кластеров в процессе проезда перекрестка является существенным фактором. Такими кластерами являются очереди из остановившихся перед каждой стоп-линией автомобилей. Но, кроме кластеров, нужно рассматривать и более широкие группы, которые, за отсутствием общераспространенного термина, по аналогии с процессами передачи данных в информационных сетях будем называть *пакетами транспортных средств*. Эти пакеты формируются в течение временных промежутков, разделенных переключениями светофоров на стоп-линиях, которые пересекаются при движении по маршруту. Все автомобили, прибывшие на вход маршрута не позднее переключения светофора на красный свет на входной стоп-линии на определенном цикле и при этом не пересекшие эту стоп-линию на предыдущих циклах, образуют пакет ТС на маршруте для этого цикла. Часть ТС этого пакета начинает проезд перекрестка на следующем цикле. Остальные ТС переходят в пакет для нового цикла, к которому присоединяются автомобили, прибывшие в течение нового цикла. Пакет ТС для нового участка маршрута определяется разделением этого участка внутренней стоп-линией при ее наличии. Во временном аспекте такие пакеты привязываются к моментам переключения светофора на красный свет на этой стоп-линии, а при ее отсутствии – к моментам переключения светофора на красный свет на входной стоп-линии. Следует подчеркнуть, что

при объединении маршрутов после точки их слияния пакет состоит из автомобилей из пакетов с двух объединяющихся маршрутов, которые были сформированы на предшествующих участках этих маршрутов.

В используемых здесь терминах процесс движения через перекресток состоит в образовании и преобразовании пакетов ТС. Количественно процесс проезда перекрестка характеризуется количеством ТС на выходных участках маршрутов для каждого цикла. Если такой участок включает точку слияния двух или трех маршрутов, требуется также установить долю каждого в таких пакетах. Итак, выходной поток на определенном направлении характеризуется последовательностью количеств ТС в пакетах каждого цикла, при наличии достаточной пропускной способности перекрестка, должен соответствовать потоку на входе для этого направления.

### **3. Возможности оптимизации светофорного регулирования для сложного перекрестка путем выбора постоянных значений его параметров в зависимости от транспортной ситуации**

Интенсивность входящих потоков и их распределение между направлениями проезда перекрестка составляют текущую транспортную ситуацию. Это усредненные показатели за период, в течение которого локальные характеристики дорожного движения стабильны (с поправками на действие случайных факторов), что позволяет оптимизировать светофорное регулирование в течение такого периода.

Если пропускная способность перекрестка принципиально достаточна для проезда по каждому направлению с требуемой интенсивностью, параметры светофорного регулирования могут быть выбраны так, чтобы наиболее надежно обеспечить движение в требуемых объемах. В этом случае при достаточно интенсивном движении нерегулярные задержки в движении по направлениям всё равно возникают в силу действия случайных факторов, но не имеют тенденции к росту. Этот случай далее и рассматривается, поскольку при недостаточности пропускной способности для текущей транспортной ситуации локальное регулирование не может обеспечить пропуск всего входящего потока без растущих задержек, и разрешение ситуации, если вообще возможно, требует принятия согласованных мер на более широком фрагменте дорожной сети.

Минимальное требование к согласованности управления на всех системах светофоров состоит в равенстве продолжительности светофорного цикла для всех систем, иначе сама система управления будет порождать нежелательные колебания прохождения транспортных потоков. В границах перекрестка маршруты движения могут разделяться и соединяться, но каждую стоп-линию пересекает определенный набор маршрутов. Следовательно, при определенной продолжительности светофорного цикла через каждую стоп-линию в среднем за цикл должно проходить известное количество транспортных средств, а именно, значение произведения суммарной интенсивности движения по этим маршрутам на длительность цикла. Эта величина и определяет минимальную продолжительность фазы. Конкретно она вычисляется в предположении, что все автомобили, пересекающие стоп-линию на соответствующих фазах, к началу фазы образовывали стоящую очередь или же присоединялись в течение фазы к движущемуся кластеру, образовавшемуся из очереди. При этих предпосылках была сформулирована общая задача оптимизации продолжительности фаз светофорных циклов для сложного перекрестка [14]. Заметим, что в таких предположениях нельзя дать никаких рекомендаций относительно временных сдвигов между циклами разных систем светофоров.

Однако используемые оценки неточны для других случаев, а именно, когда некоторые кластеры пересекают внутреннюю стоп-линию без остановки (отсутствие очереди перед внутренней стоп-линией к моменту переключения на зеленый свет возможно лишь при очень низкой интенсивности входящего потока). Рассчитанное пересечение стоп-линии не происходит в случае ее блокировки очередью, расположенной на следующем за ней участке маршрута. Такая очередь формируется перед следующей заблокированной точкой на маршруте – внутренней стоп-линией или точкой слияния маршрутов, и может достигать блокирующих размеров ввиду ограниченной протяженности участка маршрута, на котором она образуется. Все эти явления – разные случаи движения через стоп-линию и их блокировка – являются результатом действия случайных факторов в поступлении входного потока и проезде пакетов транспортных средств по участкам маршрутов. Соответственно, оценивание их действия и выработка рекомендаций относительно временных сдвигов между светофорными циклами, а также, возможно, коррекции продолжительности фаз требует явного использования вероятностных моделей дорожного движения, основанных на применении статистических характеристик транспортных потоков.

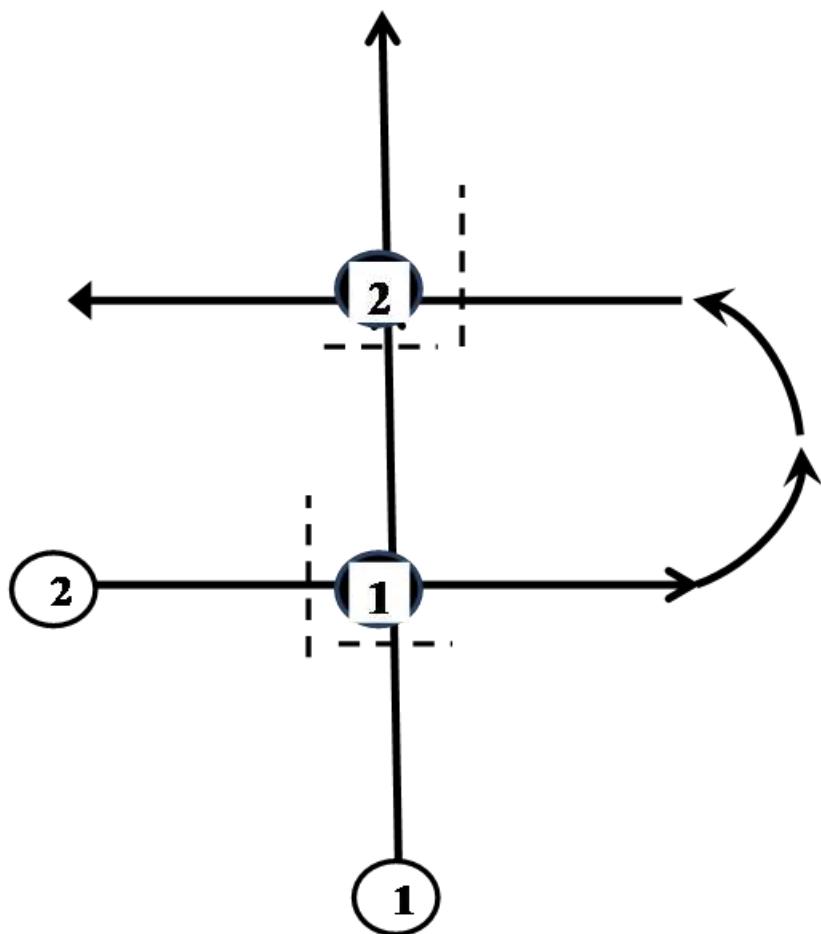


Рис. 2. Иллюстративный пример сложного перекрестка

Представленный на рис. 2 пример является лаконичной иллюстрацией основных черт многосекционного перекрестка. В примере имеются всего два маршрута M1 и M2, соответственно от входов 1 и 2, которые дважды пересекаются в конфликтных точках 1 и 2. Проезд этих точек регулируется двумя системами светофоров, цикл каждого состоит из двух фаз, разделенных межфазными промежутками безопасности. Ввиду незначительного расстояния между стоп-линиями и соответствующими точками пересечения в дальнейших расчетах мы отождествляем положения стоп-линий на маршрутах с положением точек пересечения.

Процесс проезда участков маршрутов разбивается событиями переключения светофоров и событиями проезда по маршруту следующим образом.

На входных участках обоих маршрутов выделяются промежутки времени между включением красного света и последующим включением зеленого. В течение этого времени поступающие на вход маршрута автомобили пополняют очередь перед стоп-линией, которая в начале интервала может быть пуста. Интервал, соответствующий зеленой фазе входной стоп-линии, может разбиваться на части событиями, происходящими на участке между точками пересечения. А именно, если в его начале у внутренней стоп-линии нет очереди и сама она не заблокирована, весь интервал представляет собой промежуток времени, в течение которого автомобили проезжают до конца маршруту без остановки. То же самое происходит, если к моменту подъезда к внутренней стоп-линии первого автомобиля нового пакета очередь у него отсутствует. Если же очередь имеется, но стоп-линия не заблокирована, начальная часть пакета присоединяется к кластеру, образовавшемуся из пришедшой в движение очереди. Само это событие слияния двух кластеров должно устанавливаться, т.к. изменяет динамику пересечения начальной стоп-линии.

Если имеется очередь перед заблокированной второй стоп-линией, то до момента ее разблокировки сначала происходит проезд начальной стоп-линии, который может завершиться до разблокировки второй стоп-линии в тот момент, когда участок между двумя стоп-линиями оказывается полностью занятым автомобилями. Если же этого не происходит, с момента разблокировки второй стоп-линии

начинается проезд объединенного кластера: начальной части через вторую стоп-линию, а завершающей через обе линии.

Таким образом, перечислен весь набор возможных событий, разделяющих изучаемый период на временные промежутки с разным характером динамики процесса. Особенностью рассматриваемого примера является отсутствие блокировки движения по одному маршруту автомобилями, движущимися по другому маршруту в точках их пересечения или слияния. Моменты разблокировки конфликтных точек меняют характер динамики процесса.

#### **4. Данные о текущем состоянии локального транспортного потока. Статистические характеристики процессов проезда сложного перекрестка**

Для прогнозирования развития транспортной обстановки на участке ГДС и управления ею нужно, прежде всего, иметь точную информацию о ней в динамике. Такая информация включает, в частности: 1) количество ТС на каждом участке дорожной сети в любой момент времени; 2) количество ТС, перешедших с одного участка на другой за выделенные интервалы времени. Основными первичными фиксируемыми фактами, на основе которого могут быть определены перечисленные производные данные, являются моменты пересечения заданных рубежей отдельными транспортными средствами. В настоящее время наиболее распространенным способом их получения является так называемое «компьютерное зрение». Если в пределах участка ГДС все такие события фиксируются для всех рубежей, включая границы участка, определенные на всех входных и выходных дорогах, то, не получая никаких персонализированных данных о транспортных средствах, проезжавших через этот участок в течение рассматриваемого периода, можно, тем не менее, установить траекторию движения каждого появившегося на входе транспортного средства через весь участок. Данные первого типа могут быть установлены для любого момента времени, а второго типа – для любого временного интервала. При этом предполагается их практическое использование только для выделенных моментов времени – как правило, моментов событий, существенных для динамики транспортных потоков, – и интервалов времени между такими событиями. Обработка массивов таких данных позволяет также определить статистические закономерности, о которых пойдет речь далее.

Для того чтобы можно было прогнозировать результат прохождения потока при заданном структурно-параметрическом управлении трафиком, необходимо использовать те закономерности, которые количественно определяют преобразование пакетов ТС на каждом направлении с учетом их структуры. Как правило, пересечение стоп-линий начинают автомобили, которые к моменту включения зеленого света образовывали стоячую очередь. В конечном случае, необходимо знать, сколько ТС из стоячей очереди пересекут стоп-линию в течение любого заданного промежутка времени, который может быть продолжительностью зеленой фазы. Заметим, что автомобили, появляющиеся на входе до окончания зеленой фазы, как правило, присоединяются к кластеру, образовавшемуся из стоячей очереди. При компьютерном воспроизведении входящего потока на основе его известных или гипотетических интегральных характеристик нет другой возможности, как исходить из такого предположения.

Исходя из вышесказанного, применительно к исследованию рассматриваемого примера требуется располагать статистическими характеристиками следующих процессов.

- Появление автомобилей на входе маршрута. Статистическое распределение количества автомобилей, прибывающих на вход за определенный промежуток времени. Параметр распределения: интенсивность входного потока.
- Пересечение единичной стоп-линии с последующим свободным движением по маршруту головы кластера при его первоначальном неподвижном положении. Требуется: статистическое распределение количества ТС, пересекающих стоп-линию за определенный промежуток времени с момента включения зеленого света. Данное распределение может быть получено из статистического распределения момента проезда стоп-линии головным ТС (задержки при включении зеленого света) и временных интервалов между моментами проезда  $N$ -м и  $(N+1)$ -м автомобилями кластера.
- Статистическое распределение количества автомобилей из стартовавшей очереди, пересекающих следующий рубеж (в данном случае – вторую стоп-линию) за определенный промежуток времени с момента ее старта.
- Пересечение единичной стоп-линии с последующей остановкой (параметр – положение остановки лидера кластера). Распределение количества ТС, пересекающих стоп-линию за определенный промежуток времени. С учетом ограниченности места между местом остановки головного

автомобиля и стоп-линией ограничено и максимальное их количество и, начиная с некоторого значения продолжительности промежутка времени, распределение перестает изменяться.

Закономерности должны быть установлены для любого допустимого маршрута  $P$  и выделенного узла  $k$  на нем. В качестве первичных данных для установления зависимостей, касающихся пересечения единичной стоп-линии удобнее фиксировать данные о движении отдельных автомобилей в составе кластера. На их основе устанавливаются, в частности, распределения промежутков времени  $\Delta T_{SL}$  между проездом стоп-линии ( $N-1$ )-м и  $N$ -м ТС в кластере, образовавшемся из стоячей очереди. Параметр  $N$  включен в соответствии с основанными на практическом опыте рекомендациями [5].

$$F_{\Delta T SL}(\Delta T_{SL}; P, k, N). \quad (1)$$

Зависимость (1) относится не только к пересечению стоп-линии, но и к проезду через временно заблокированной точки слияния или пересечения после окончания блокировки. Для получения таких зависимостей достаточно обработать данные по значительному количеству стартующих кластеров и всех ТС в каждом кластере момент пересечения стоп-линии и его скорость в этот момент. В такой же форме при  $N=1$  выражается промежуток времени между включением зеленого света и моментом пересечения стоп-линии головным ТС кластера.

Фактически зависимости в первой форме достаточно установить для нескольких типов участков, содержащих стоп-линию или иную блокирующую точку — от прямых до сильно искривленных (разворот или крутой поворот). Для зависимости во второй форме геометрия участка маршрута между двумя блокирующими точками должна быть учтена, но она важна лишь для сильно искривленных маршрутов. Место, в котором остановится головное ТС стартующего кластера перед второй стоп-линией, определяется положением заднего бампера автомобиля, завершающего стоячую очередь перед ним и, следовательно, расстояние до стоп-линии может принимать различные значения, которые должны быть сведены к дискретному набору.

Практически представленное в виде (1) вероятностное распределение приближается значениями вероятности  $p_{\Delta T SL}(\Delta T_{SLj}; P, k, N)$  для фиксированного ряда значений  $\{(\Delta T_{SLj}, j=1\ldots, N_{\Delta T SL}(\Delta T_{SLj}; P, k, N)\}$ . На этой основе для фиксированного  $N$  нужно определить вероятность всевозможных значений сумм  $\Delta T_{SL\Sigma}(j(1), j(2), \ldots, j(N)) = \Delta T_{SLj(1)} + \Delta T_{SLj(2)} + \ldots + \Delta T_{SLj(N)}$ . Если такое значение встретилось единственный раз, его вероятность есть

$$p_{\Pi}(j(1), j(2), \ldots, j(N)) = p_{\Delta T SL}(\Delta T_{SLj(1)}) \times p_{\Delta T SL}(\Delta T_{SLj(2)}) \times \ldots \times p_{\Delta T SL}(\Delta T_{SLj(N)}), \quad (2)$$

иначе нужно просуммировать все  $p_{\Pi}(j(1), j(2), \ldots, j(N))$ , дающие то же значение  $\Delta T_{SL\Sigma}(j(1), j(2), \ldots, j(N))$ . Теоретически можно перебрать все такие комбинации, но гораздо практичеснее для получения приемлемой оценки искомого распределения этой величины воспользоваться методом Монте-Карло. Если не фиксировать  $N$ , то можно разыгрывать достаточно длинные последовательности со значением  $N$ , заведомо превышающем максимально возможное (количество ТС в кластере). В такой последовательности значения  $j(n), n=1, 2, \ldots, N_{\text{MAX}}$ , назначаются независимо друг от друга с вероятностями  $p_{\Delta T SL}(\Delta T_{SLj(n)}; P, k, N)$ . Интересующий нас набор значений продолжительности интервала  $\Delta T_{SL\Sigma}$  можно приблизить множеством  $\{\Delta T_{SLj(1)}\}$ . В каждой такой последовательности находим  $N_{\Sigma}(t)$  по условию:  $\Delta T_{SL\Sigma}(j(1), j(2), \ldots, j(N_{\Sigma}(t))) \leq t$ ,  $\Delta T_{SL\Sigma}(j(1), j(2), \ldots, j(N_{\Sigma}(t)+1)) > t$ . Единичная последовательность дает конкретное значение  $N_{\Sigma}(t)$  для любого рассматриваемого  $t$ , а многократное повторение вычислений даст хорошие оценки распределений  $N_{\Sigma}(t)$ . Результат применения такого способа обработки данных показан в таблице 1. Исходные данные получены для стоп-линии, расположенной на улице Гарибальди перед поворотом на Профсоюзную улицу в направлении на юг. Заметим, что при некоторых значениях  $T$  получаемые распределения не являются унимодальными. Это обстоятельство, по-видимому, связано с наличием в городском транспортном потоке нескольких групп автомобилей с существенно различающимися размерами и динамикой и отсутствием в нем транспортных средств с промежуточными характеристиками. Присутствие в потоке среди преобладающих в нем легковых автомобилей небольшого количества грузовых существенно влияет на общие характеристики его движения.

Таблица 1. Статистическое распределение количества автомобилей, пересекающих стоп-линию за заданное время (с последующим поворотом на магистраль)

$t$	$Q_0, Q_{10}$	$Q_1, Q_{11}$	$Q_2, Q_{12}$	$Q_3, Q_{13}$	$Q_4, Q_{14}$	$Q_5, Q_{15}$	$Q_6, Q_{16}$	$Q_7, Q_{17}$	$Q_8, Q_{18}$	$Q_9, Q_{19}$
1.0	0.652	0.348								
2.0	0.047	0.853	0.100							

<i>t</i>	<i>Q<sub>0</sub>, Q<sub>10</sub></i>	<i>Q<sub>1</sub>, Q<sub>11</sub></i>	<i>Q<sub>2</sub>, Q<sub>12</sub></i>	<i>Q<sub>3</sub>, Q<sub>13</sub></i>	<i>Q<sub>4</sub>, Q<sub>14</sub></i>	<i>Q<sub>5</sub>, Q<sub>15</sub></i>	<i>Q<sub>6</sub>, Q<sub>16</sub></i>	<i>Q<sub>7</sub>, Q<sub>17</sub></i>	<i>Q<sub>8</sub>, Q<sub>18</sub></i>	<i>Q<sub>9</sub>, Q<sub>19</sub></i>
3.0		0.731	0.269							
4.0		0.450	0.394	0.156						
5.0		0.242	0.489	0.269						
6.0		0.047	0.569	0.227	0.156					
7.0			0.361	0.370	0.172	0.097				
8.0			0.242	0.375	0.195	0.091	0.097			
9.0			0.075	0.375	0.281	0.126	0.045	0.097		
10.0			0.047	0.217	0.374	0.141	0.124	0.048	0.050	
11.0			0.179	0.353	0.198	0.113	0.059	0.048	0.050	0.179
12.0			0.099	0.284	0.269	0.127	0.124	0.048	0.099	0.284
10-19	0.05									
13.0				0.075	0.189	0.336	0.131	0.113	0.059	0.0
(10-19)	0.048	0.050								
14.0					0.179	0.335	0.137	0.127	0.121	0.003
(10-19)	0.0	0.048	0.050							
15.0						0.124	0.258	0.222	0.126	0.113
(10-19)	0.0	0.0	0.048	0.050						

## 5. Организация анализа и оптимизации светофорного регулирования

В примере, представленном на рис. 2, обе системы светофоров их обеспечивают пропуск по каждому маршруту одного и того же количества автомобилей через соответствующие стоп-линии. Поэтому их светофорные циклы должны делиться на фазы для пропуска по каждому маршруту примерно в одной и той же пропорции, соответствующей интенсивностям движения по маршрутам. Проблемным вопросом является оптимальный временной сдвиг между циклами. В данном случае участок маршрута между двумя точками их пересечения для второго маршрута существенно длиннее и к тому же он искривлен в отличие от первого, поэтому время проезда его существенно больше. Имеет значение также соотношение между продолжительностями движения по рассмотренным участкам и продолжительностью светофорных циклов. Эти параметры взаимоувязаны: при коротких периодах между открытием для первого маршрута входной стоп-линии и закрытием второй создаются условия, при которых участок между ними заполняется автомобилями задолго до окончания периода пропуска через первую стоп-линию, что неэффективно в отношении обеспечения прохождения всего потока по этому направлению.

Для сопоставления результатов применения рассматриваемых параметров светофорного регулирования нужно организовать серии вычислительных экспериментов с сопоставимыми условиями. В данном примере интенсивность проезда по направлениям должна соответствовать интенсивности их входных потоков. Сопоставимость результатов для разных значений параметров регулирования требует, чтобы во всех случаях обрабатывались бы одни и те же входные последовательности моментов появления ТС на входах — возможные реализации потоков с выбранными значениями интенсивностей. Собственно прохождение потока через перекресток может порождать разные последовательности событий, описанных выше. Каждое событие определяет тип процесса, начинаяющегося с момента его наступления. Набор возможных типов процессов и соответствующих им статистических зависимостей был охарактеризован выше. Следующий этап процесса дорожного движения в его конкретной реализации получается стохастической генерацией реализации частного процесса установленного типа. В результате в момент каждого события определяются количества транспортных средств на некоторых участках локальной дорожной сети в целом или, более детально, в разных состояниях (стояние в очереди, определенный этап движения). Это, в свою очередь, позволяет установить момент следующего события как момент окончания текущего частного процесса.

Числовые характеристики единичного события не требуют значительных вычислений. Так, если по параметрам регулирования установлен временной интервал, в течение которого разрешено пересечение стоп-линий, по его длительности *t* устанавливаем соответствующую строку таблицы 1 и, сгенерировав очередное значение *r* равномерно распределенной на  $[0, 1]$  случайной величины, используем его для выбора значения количества проехавших автомобилей. А именно, выбираем то минимальное значение *N*, для которого сумма значений в строке от 1 до *N* не меньше *r*. Наоборот, для определения *t* по значению *N* как минимального целого значения продолжительности времени, достаточного для проезда *N* автомобилей, аналогичным образом используем другую таблицу, в которой строки соответствуют *N*, а столбцы — *t*. Источником для формирования такой таблицы служит

тот же массив данных, что и для первой, только порядок группировки иной. Для некоторых расчетов потребуется также выполнять процедуру одномерной интерполяции, когда исходная информация относится к параметрическим зависимостям и получена для известного ряда значений параметра. Остальные вычисления еще менее трудоемки и сводятся к сложениям или к сравнениям числовых величин. Таким образом, для выполнения большого количества однотипных рандомизированных расчетов не требуется значительных вычислительных ресурсов.

Важно подчеркнуть, что из-за действия случайных факторов эффект использования для светофорного регулирования определенного набора значений параметров может быть оценен только усредненно.

## 6. Заключение

Дорожное движение в городе в целом испытывает воздействие множества случайных факторов, но в особенности это относится к регулируемым перекресткам. Это вызывает значительные затруднения для выработки эффективного управления ими. Последнее, следует подчеркнуть, осуществляется не только на параметрическом уровне, путем определения продолжительности фаз светофорного цикла, но и на структурном уровне, – путем установления количества фаз светофорного цикла, схем проезда на каждой и их последовательности в цикле.

Обеспечение безопасного движения и эффективного использования ресурсов дорожной сети на перекрестках, осуществляющих сопряжение множества направлений проезда на входных и выходных дорогах, приводит к организации движения с устройством внутренних стоп-линий. Для них задача выбора эффективного структурно-параметрического управления применительно к определенному состоянию локальных транспортных потоков особенно сложна из-за большего количества параметров, многостадийного прохождения потока по некоторым направлениям и необходимости учитывать пространственную ограниченность области перекрестка.

Компьютерное моделирование дорожного движения с определенным выбором управления из множества возможных является естественным инструментом для оптимизации управления. Для его использования, однако, требуется применить адекватную форму математического описания процессов и, с другой стороны, обеспечить расчеты эмпирической информацией в удобной для применения форме.

В настоящей работе предлагается использовать модель мезоуровня, отражающую пространственно-временную структуру дорожного движения. Во временном аспекте она передает динамику моделируемого процесса в дискретно-событийном представлении, т.е. с привязкой величин к моментам событий, изменяющих характер составляющих его частных процессов. Последние либо являются результатом действия системы управления (переключения светофоров), либо выражают достижение определенных пространственных рубежей группами транспортных средств. Что касается эмпирических данных, то они имеют две составляющие: 1) данные о текущей транспортной обстановке и 2) статистические закономерности, характеризующие несколько типов транспортных процессов на сложном перекрестке,

На этой основе предложен принципиальный подход к обоснованию выбора параметров управления. Данный подход сочетается с их предварительной оптимизацией на основе детерминированных взаимосвязей, отражающих усредненное протекание транспортных процессов.

Дальнейшим развитием управления сложными перекрестками должно стать распространение на них методов адаптивного регулирования на основе принципов автоматического управления.

## Литература

1. Живоглядов В.Г. Теория движения транспортных и пешеходных потоков. Ростов н/Д: Известия вузов Сев.-Кавк. региона, 2005. – 1082 с.
2. Андронов Р.В., Леверенц Е.Э. Статистическое моделирование работы регулируемых пересечений: монография / Р.В. Андронов, – Тюмень: ТИУ, 2025. – 160 с.
3. 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.
4. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. – 69 с.
5. MnDOT Traffic Signal Timing and Coordination Manual. – Minnesota Department of Transportation, 2017. – P. 2–11.
6. Signalized Intersections: Informational Guide. Publication Number: FHWA-HRT-04-091. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation/ Federal Highway Administration, 2004.

7. 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.
8. 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, № 1. – P. 1–11.
9. Чебыкин И.А., Семенов С.С. Автоматизация мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2020. – № 4. – С. 52–60.
10. 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.
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. No. 03023.
12. Valuev A.M. Some Ways of Informational Instrumentation for Adaptive Urban Traffic Control by Monitoring Data Treatment // 2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – IEEE Xplore Digital Library, 2024, Art. 10564654. – P. 1–8.
13. 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.
14. Соловьев А.А., Валуев А.М. Проблема оптимизации управления перекрестком с многостадийным прохождением транспортных потоков // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2020): труды Тринадцатой междунар. конф., 28-30 сентября 2020 г., Москва / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна; М.: ИПУ РАН.
15. 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., Соловьев В.О., Овчинников Н.М. и др. – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2018. – 126 с.
16. 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.
17. Валуев А.М. Компьютерное моделирование стохастического транспортного потока через перекресток на базе данных мониторинга // 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. 426–435.