

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Транспортные системы и технологии»

Д. С. Саражинский
Д. В. Капский

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО ПЛАНА
КООРДИНИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ УЧАСТКА УДС

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация
дорожного движения», 1-44 01 06 «Эксплуатация
интеллектуальных транспортных систем
на автомобильном и городском транспорте»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск
БНТУ
2022

УДК 656.05(075.8)
ББК 39.808я7
С20

Рецензенты:
А. А. Лосин, Н. А. Филиппова

Саражинский, Д. С.
С20 Построение графоаналитического плана координированного регулирования для участка УДС : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения», 1-44 01 06 «Эксплуатация интеллектуальных транспортных систем на автомобильном и городском транспорте» / Д. С. Саражинский, Д. В. Капский. – Минск : БНТУ, 2022. – 46 с.
ISBN 978-985-583-793-1.

Пособие предназначено для студентов транспортных и дорожных специальностей для выполнения ими курсовой работы. Изложена подробно методика выполнения работы с использованием графоаналитического метода.

УДК 656.05(075.8)
ББК 39.808я7

ISBN 978-985-583-793-1

© Саражинский Д. С., Капский Д. В., 2022
© Белорусский национальный
технический университет, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Теоретические основы	6
Выполнение работы	10
Библиографический список	26
Приложения	27
Приложение А. Специфика измерения базовых характеристик оперативной дорожно-транспортной ситуации для построения плана координированного регулирования	27
Приложение Б. Приведение оперативной ситуации по вариации транспортно-пешеходного спроса	35
Приложение В. Выбор расчетной оперативной дорожно-транспортной ситуации	40
Приложение Г. Итеративный алгоритм прогнозирования распределения транспортного спроса по полосам	42

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Интеллектуальные транспортные системы в дорожном движении» относится к одной из завершающих при подготовке специалистов по управлению дорожным движением и нацелена на формирование у студентов базовых знаний, умений и навыков в области организации системного управления дорожным движением на базе интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Для этого она, в частности, предполагает выполнение студентом курсовой работы по теме, касающейся такого «классического» базового способа системного управления в ИТС, как координированное регулирование дорожного движения.

Курсовая работа носит название «Построение графоаналитического плана координированного регулирования для участка УДС», что отражает следующую ее особенность: работа ориентирована в первую очередь на использование аналитических методов, которые, несмотря на известную ограниченность возможности их использования (в силу трудоемкости) в реальных проектах подобного рода, в то же время наилучшим образом способствуют формированию и закреплению базовых понятий и принципов соответствующего управления. К дополнительным особенностям работы (отличающим ее от работы над реальными проектами подобного рода, и соответственно, придающим ей характер учебной) можно отнести:

– нацеленность на *результативность* (степень достижения желаемого системного эффекта), в отличие от нацеленности на *эффективность* (отношение степени достижения желаемого эффекта к затраченным ресурсам), как это типично требуется в реальных проектах;

– ограниченность круга организационных мероприятий, относящихся большей частью к программному управлению светофорной сигнализацией, в отличие от реальных проектов, которые предполагают также привлечение общих методов организации дорожного движения для повышения результативности координированного регулирования.

Эти особенности вызваны ограниченностью времени на выполнение работы, а также наличием заполняющих соответствующие пробелы лабораторных работ.

Далее даются методические рекомендации по выполнению соответствующей курсовой работы, при этом предполагается, что вы-

полняющий уже владеет первичным представлением об основных понятиях, связанных с координированным управлением, полученным в ходе изучения данной дисциплины, а также дисциплин «Информатика», «Математические модели в транспортных системах», «Технические средства организации дорожного движения», «Организация дорожного движения».

Кроме того, предполагается, что студент уже получил от преподавателя задание на курсовую работу в установленной форме.

Теоретические основы

Под *координированным регулированием* понимается разновидность системного управления, при котором согласование работы светофорных объектов осуществляется за счет выдерживания разностей моментов включения сигналов на соответствующих светофорных объектах (так называемых сдвигов).

Координированное управление базируется в первую очередь на том факте, что в одних и тех же условиях времени (среднепутевые скорости) движения транспортных средств от одного светофорного объекта к другому при их достаточно близком расположении не слишком отличаются от некоторого «среднего» значения.

Этот факт позволяет достаточно точно для не слишком далеко расположенных светофорных объектов управлять моментами времени появления транспортного средства на подходе к одному из них за счет управления моментами времени, когда ему разрешается покинуть другой.

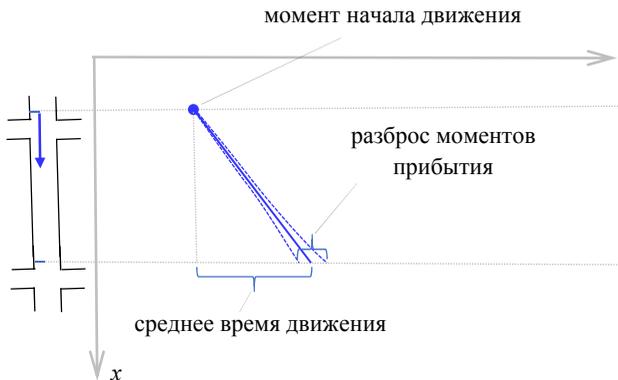


Рис. 1

Как правило, организация координированного управления осуществляется на базе циклической сигнальной диаграммы светофорного регулирования (диаграмма, сигналы которой для каждой сигнальной группы носят циклический характер), с фиксированной длительностью цикла C (длительности цикла повторения последовательности сигналов для каждой сигнальной группы одинаковы).

Основными параметрами задания такой диаграммы являются:

- 1) порядок включения сигналов отдельных сигнальных групп;
- 2) длительности сигналов;
- 3) сдвиг по циклу (точки отсчета) диаграммы относительно единого времени (рис. 2).

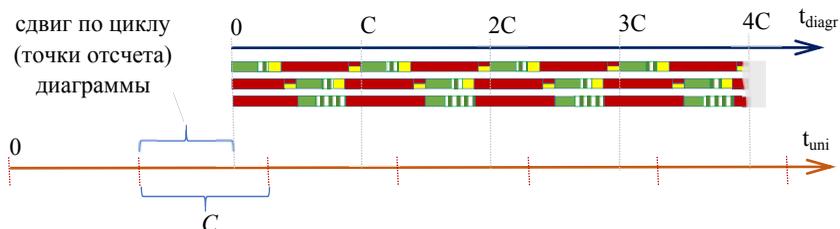


Рис. 2

Замечание 1. Длительность цикла при таком рассмотрении не является независимым параметром, поскольку он однозначно определяется указанными выше параметрами. Однако при определенных ситуациях оказывается удобно считать ее независимым параметром, от которого наоборот зависят отдельные параметры 1, 2.

Замечание 2. Типично организация координированного регулирования предполагает, что длительность цикла на всех светофорных объектах одинакова (или, в исключительных случаях, кратна).

Набор указанных параметров для всех координируемых светофорных объектов называется *планом координации (ПК)*.

Соответственно, процедура построения плана координации является процедурой поиска параметров, обеспечивающей нужный системный эффект.

В зависимости от того, какой системный эффект необходимо организовать, возможны различные разновидности координированного регулирования. Наиболее известные из них:

- координированное управление с организацией «зеленой волны» (ленты безостановочного движения) – системный эффект – безостановочность движения через участок;

- координированное управление с организацией «обратной зеленой волны» (reverse progression) – системный эффект – максимальная пропускная способность через участок.

Координированное управление с организацией «зеленой волны» – наиболее распространенная разновидность, особенно хорошо зарекомендовавшая себя в случаях, когда требуется организовать безостановочность движения по прямолинейным маршрутам следования (например, по участку улицы). Соответствующее координированное управление в этом случае принято называть *магистральным (arterial)*.

При организации такого управления удобным оказывается использование так называемого *графического представления плана координации* (путь, время) в координатах (*time-space diagram*), на котором по одной из осей откладывается единое для координируемых светофорных объектов время, по другой – координаты расположения стоп-линий вдоль координируемых маршрутов следования, после чего напротив координаты каждой стоп-линии вычерчивается временная развертка сигналов, управляющих на данном светофорном объекте движением по координируемому маршруту. Условные ленты, образованные всеми возможными гипотетически траекториями безостановочного движения со «средними» скоростями от крайних стоп-линий маршрутов, называются *лентами безостановочного движения* (рис. 3).

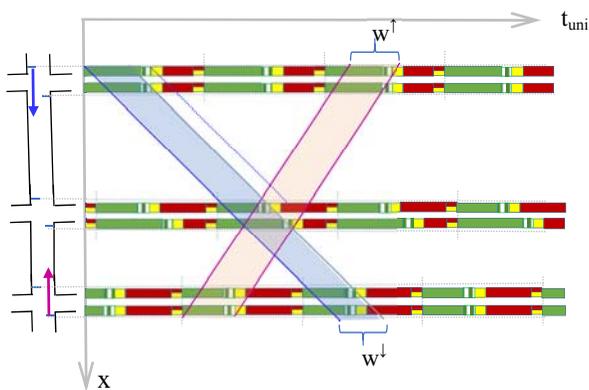


Рис. 3

Величины относительной ширины лент проезда (относительно длительности цикла или длительности разрешающего движения сигнала в начале ленты) обычно выступают первичными количественными показателями качества плана координации, однако

широкие ленты, хоть и являются необходимыми, но не гарантируют достижения нужного системного эффекта безостановочности движения в реальности. Для этого используются дополнительные показатели. Для небольших по протяженности участков¹ в качестве простейшего из них можно рассматривать так называемый *коэффициент безостановочной проходимости/проезда*:

$$\beta = Q_1 / Q_0,$$

где Q_0 – количество въезжающих на координируемый маршрут;

Q_1 – количество тех из них, кто проехал без остановки.

Но поскольку для его определения нужно знать соответствующее количество проехавших без остановки транспортных средств, в общем случае получить точное значение этого коэффициента можно только либо путем имитационного моделирования, либо в реальном эксперименте. С другой стороны, есть возможность достаточно легко, на основе информации об интенсивности движения и плане координации, получить его оценку (приблизительное значение). Действительно, движение участников можно рассматривать как осуществляющееся «в среднем» по траекториям, представляющим собой ломаную, с изломами, отвечающими изменению режима движения (рис. 4).

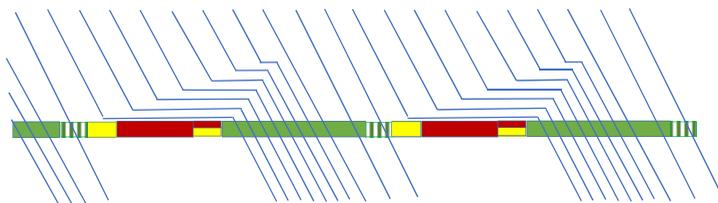


Рис. 4

Зная по плану координации, в каких местах должны происходить изменения режима движения каждого въезжающего на участок транспортного средства, можно построить его траекторию движения и предсказать, проедет он участок без остановки или нет.

¹ Для которых в силу небольшой протяженности можно ожидать сквозное транзитное движение подавляющего большинства транспортных средств

Примечание 1. Как видно из рис. 4, убывающие из очереди транспортные средства образуют движущуюся по маршруту с некоторой одинаковой скоростью плотную группу, которую называют «пачкой». Несмотря на то, что со временем «пачка» начинает распадаться, при достаточно малых расстояниях между светофорными объектами этот эффект оказывается не слишком значительным, а потому можно говорить о пачкообразном характере транспортного потока при движении по участку с близкорасположенными светофорными объектами.

Выполнение работы

Как известно, любая проектная работа подобного рода предполагает проведение исследования. В свою очередь, всякое исследование характеризуется *ситуацией исследования*, задающей:

- спецификой цели исследования (определяет цель исследования);
- спецификой объекта исследования (определяет что существенно, а что может быть отброшено как несущественное для достижения цели при рассмотрении объекта исследования).

Соответственно, прежде чем приступить к работе, необходимо четко определить для себя специфику ситуации исследования. И если с определением цели все достаточно просто, поскольку ее легко сформулировать исходя из задания, а именно – целью работы является разработка магистрального координированного управления с организацией лент безостановочного движения («зеленой волны») для заданного участка УДС (на заданный период времени), – то с определением специфики объекта исследования ситуация сложнее. Здесь требуется уже полученный в результате всего процесса обучения опыт и понимание сути требований к работе. Для упрощения последнего полезно поступить следующим образом – представить, что работа инициирована неким реальным заказчиком (например, представителем ГАИ), который хотел бы от исполнителя в лице студента получить реальный проект организации координированного регулирования участка УДС в соответствии с требованиями, в точности совпадающими с указанными в задании на курсовую работу.

Определившись с целью и ситуацией исследования в целом, далее следует определиться с задачами, которые необходимо решить, для достижения цели. Типично их можно подразделить на два класса.

1. Задачи, связанные со сбором исходных данных:

- 1) исследование специфики инфраструктуры участка УДС;
- 2) исследование специфики светофорного регулирования на участке УДС;
- 3) исследование специфики транспортного и пешеходного движения на заданном участке УДС.

2. Задачи, связанные с разработкой самого проекта (на основе исходных данных):

- 1) выбор расчетной дорожно-транспортной ситуации;
- 2) построение и оценка результативности искомого плана координации;
- 3) оценка реализуемости построенного плана координации;
- 4) определение технологических привязок ПК для заданных технических средств организации координированного регулирования.

При решении задач из первого класса очень важно постоянно обращаться к ситуации исследования и ограничиваться сбором и обработкой только тех данных и только с той точностью, отсутствие которых может существенно сказаться на возможности достижения цели работы. Результатами решения задач из этого класса выступают:

1) для первой задачи – описание участка, включающее в себя только существенные для выполнения работы данные (топологию/схему участка, линейные размеры перегонов от стоп-линии до стоп-линии, особенности инфраструктуры, влияющие на скорость движения на перегонах, геометрические данные, существенные для предполагаемой в данной работе разработки диаграмм светофорного регулирования), а также другая релевантная для цели данной работы информация об организации движения на участке;

2) для второй задачи – описание существенной для целей работы информации о программах регулирования (технология управления светофорной сигнализацией (потактовая или на основе разновидности управления по сигнальным группам), релевантная информация о сигнальных группах, датчиках, алгоритмах управления и диаграммах светофорного регулирования в них);

3) для третьей задачи – описание существенных для цели работы статистических показателей движения на участке:

- а) базовые статистические показатели транспортного и пешеходного спроса на передвижение на участке, а именно,
– средние величины интенсивности спроса (по каждому типу);

– величины индексов дисперсии, или VMR (Variance-to-Mean Ratio), интенсивности спроса (по каждому типу).

Замечание 3. В идеале, соответствующая информация должна быть привязана ко всем возможным маршрутам движения через участок. Но в силу достаточной сложности сбора такой информации и в предположении, что на выбранном участке единственными существующими для работы длинными (включающими проезд нескольких светофорных объектов) маршрутами являются только рассматриваемые координируемые маршруты, представление соответствующей информации может ограничиться привязкой не к маршрутам, а к направлениям движения на отдельных светофорных объектах;

б) информация о статистическом распределении среднепутевых скоростей движения через основные (для работы) фрагменты участка, типично представлена в виде эмпирической функции распределения (кумулятивной кривой) и диаграммами размаха (box-and-whisker diagram).

Касательно задач второго класса, следует учитывать некоторые аспекты.

1. Выбор расчетной дорожно-транспортной ситуации

Под *расчетной дорожно-транспортной ситуацией* понимается ситуация, на характеристики которой предполагается опираться при проведении всех расчетов, связанных с построением плана координации. Соответственно, для ее задания необходимо определиться:

- какие вообще характеристики дорожно-транспортной ситуации необходимы для выполнения соответствующих расчетов;
- каким образом выбирать значения этих характеристик.

Расчеты, в которых участвуют характеристики расчетной дорожно-транспортной ситуации, включают оценку результативности ПК (в частности, коэффициента безостановочной проходимости) и оценку реализуемости ПК (в частности, оценки критических показателей функционирования светофорного объекта, таких как загрузка движением и загрузка очередями). В простейшем случае для проведения соответствующих расчетов можно использовать моделирование транспортно-пешеходного движения равномерными по прибытию ко входам в участок, сжимаемыми (уплотняемыми) на светофорных объектах потоками, движущимися с некоторыми постоянными для

выделенных фрагментов участка скоростями. Соответственно, в этом случае в качестве основных характеристик будут выступать:

- расчетные величины интенсивности спроса (по типам и направлениям движения);
- расчетные скорости движения через основные (для работы) фрагменты участка.

Для обоснованного выбора значений этих характеристик необходимо опираться на ситуацию исследования. В качестве возможных подходов к такому выбору можно ориентироваться на подход, приведенный в прил. А–Г.

2. Построение и оценка результативности плана координации

Построение варианта ПК графоаналитическим методом типично предполагает выполнение следующих шагов.

Шаг 1. Подготовить программные средства для проведения быстрого построения/перестроения (технологически реализуемых² (!)) диаграмм светофорного регулирования к диаграмме с произвольной длительностью цикла по *процедуре перемасштабирования*. Это наиболее простая, но в то же время позволяющая максимально сохранить (при преобразовании) существующий баланс пропускных способностей сигнальных групп процедура, суть которой заключается в следующем: пусть требуется из диаграммы с длительностью цикла $C^{(1)}$ путем изменения длительностей ее сигналов получить диаграмму с длительностью цикла $C^{(2)}$. Для того чтобы это сделать, необходимо умножить все длительности разрешающих движение сигналов первой диаграммы на коэффициент масштабирования $C^{(2)}/C^{(1)}$ (с округлением к целым по правилам округления). После чего следует перестроить первую диаграмму на основе данных значений. Как правило, при этом (из-за неизменности переходных интервалов диаграмм) будет наблюдаться либо избыток времени (при масштабировании к большему циклу), либо его недостаток (при масштабировании к меньшему). В этом случае следует напрямую

² То есть допускающих реализацию в рамках предполагаемой (или требуемой по заданию) технологии программного управления светофорной сигнализацией

произвести коррекцию диаграммы (отдавая предпочтение сигнальным группам координируемых направлений).

Шаг 2. Подготовить программные средства для проведения быстрого построения/перестроения графического представления плана координации за счет быстрого манипулирования графическими примитивами в масштабируемой прямоугольной координатной сетке (в частности, предоставляющих возможности простой группировки примитивов и совместного преобразования таких групп путем параллельного переноса и перемасштабирования).

Шаг 3. Выделить предполагаемый диапазон допустимых длительностей циклов, обычно определяемый из соображений минимально возможных длительностей циклов по базовым минимальным временам по безопасности, по минимально необходимой пропускной способности, а также максимально возможным длительностям по терпеливым временам ожиданий, критическим длинам очередей и минимально необходимой пропускной способности для движущихся в конфликте направлений (например, поворотов налево в конфликте со встречным движением). В процессе проведения соответствующего анализа может быть полезным «забежать наперед» и обратиться к работе по расчету коэффициентов загрузки полос при существующих диаграммах светофорного регулирования в третьем вопросе второго класса.

Шаг 4. Подготовить базовый шаблон графического представления плана координации (рис. 5), а именно, в масштабируемой прямоугольной координатной сетке, полагая, что вертикальная ось соответствует пространственным координатам (в метрах), а горизонтальная – временным (в секундах):

4.1) на вертикальной оси отметить точки расположения стоп-линий по координируемым маршрутам;

4.2) прочертить горизонтальные линии, проходящие через эти точки (*линии разверток сигналов*);

4.3) начиная с точки, соответствующей нулевому моменту времени и расположению у самой первой стоп-линии на пути следования «сверху–вниз», построить из примитивов траекторию движения гипотетического транспортного средства, которое двигалось бы с постоянными на отрезках от стоп-линии до стоп-линии скоростями, соответствующими расчетным. Для построения траектории на каждом отрезке достаточно отметить точку начального положения

транспортного средства, после чего рассчитать предполагаемое время движения к следующей стоп-линии по известным расстоянию и скорости, после чего нанести соответствующую точку на временной оси и соединить с исходной прямой линией. После чего сгруппировать все примитивы в один графический объект траектории движения и сделать его копию, расположив параллельно с некоторым небольшим сдвигом по горизонтали.

То же самое проделать для направления движения «снизу–вверх».

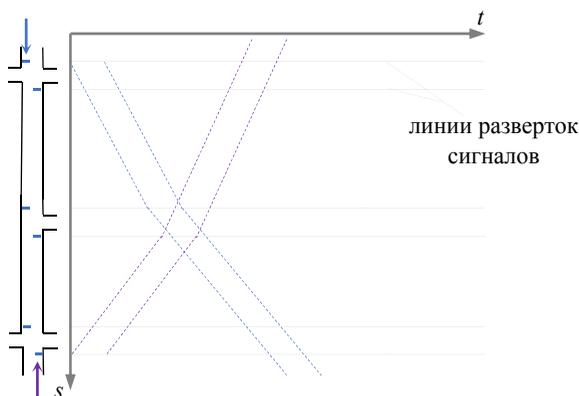


Рис. 5

Шаг 5.

5.1) из диапазона допустимых длительностей циклов выбрать некоторую длительность цикла и привести к ней с помощью процедуры перемасштабирования существующие диаграммы светофорного регулирования;

5.2) сформировать на основе данных диаграмм «затравочный» план координации путем добавления к ним некоторых сдвигов по циклу, например, всех равных нулю;

5.3) на основании построенного шаблона графического представления плана координации и имеющегося варианта плана координации:

5.3.1. Для каждой стоп-линии:

- определить сигнальную группу, управляющую движением по координируемому маршруту, проходящему через эту стоп-линию;
- вдоль линии развертки отметить тонкими цветными прямоугольниками (красными и зелеными, касающимися одной стороной этой

линии, а другой расположенными за стоп-линией (!) по ходу движения) интервалы времени, соответствующие разрешающим и запрещающим движением сигналам «затравочного ПК» (протяженностью в несколько светофорных циклов. При этом полезно начала каждого светофорного цикла отметить отдельной вертикальной отсечкой).

5.3.2. Сгруппировать все примитивы разверток сигналов, относящиеся к одному и тому же светофорному объекту, и обратить внимание на то, что параллельный горизонтальный перенос такой группы соответствует изменению сдвига по циклу сигнальной диаграммы в плане координации.

5.3.3. Для направления «сверху-вниз» параллельно перенести подготовленные в шаблоне траектории движения гипотетического транспортного средства в позиции, соответствующие моментам начала и окончания первого от нуля интервала разрешающего движения сигнала на первой по маршруту его следования стоп-линии; после чего сгруппировать обе траектории с графическим объектом разверток сигналов на этом светофорном объекте.

Проделать то же самое для направления движения «снизу-вверх».

5.3.4. Путем непосредственного анализа за гипотетическим траекториями движения (каждая из которых будет повторять уже построенные траектории, с разницей лишь в точках отправления) построить передний и задний края лент проезда (если это удастся сделать) (рис. 6).

5.3.5. Оценить качество плана по базовым качественным показателям (см. примечание 2) и по количественному показателю результативности, базирующемуся на величинах ширины лент проезда (см. примечание 3).

5.3.6. Если оно неудовлетворительно, тогда

– **если** еще не предпринимались/не исчерпали себя попытки улучшить план за счет изменения сдвигов по циклу сигнальных диаграмм, **то** выбрать новые числовые значения сдвигов с одновременным выполнением горизонтальных параллельных переносов сгруппированных объектов сигнальных разверток и связанных с ними траекторий движения на каждом светофорном объекте так, чтобы сдвиг отсечки начала цикла соответствовал бы сдвигу по циклу в новом варианте плана координации (рис. 7). Для ускорения поиска подходящих сдвигов рекомендуется ознакомиться с примечанием 4.

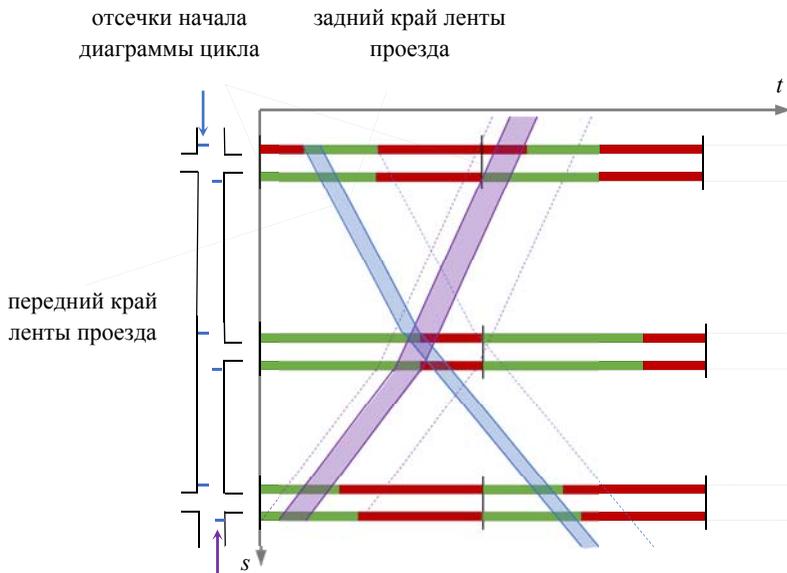


Рис. 6

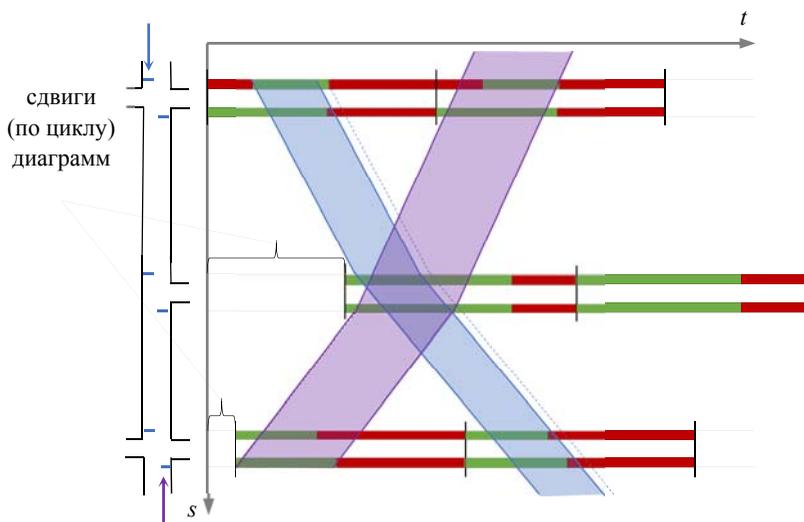


Рис. 7

Далее перейти к п. 5.3.5:

– **иначе, если** еще не предпринимались/не исчерпали себя попытки улучшить план за счет изменения длительности циклов, **то** выбрать план координации с другой длительностью цикла (по поводу выбора полезно ознакомиться с примечанием 5), то есть повторить всю процедуру построения заново, начиная с п. 5.1), при этом, возможно, используя вместо шаблонного текущее графическое представление плана координации;

иначе рассмотреть возможность изменения длительностей сигналов сигнальных диаграмм и/или, в крайнем случае (если это допускается заданием), порядок их переключения.

5.3.7. Оценить результативность плана по показателю, учитывающему специфику движения транспортных потоков, к каковым относится, например, оценочный показатель безостановочной проходимости. Для выполнения этого требуется:

– на первых на пути следования по координируемым маршрутам входах регулируемых пересечений выбрать полосу, которую, в данной ситуации исследования, можно рассматривать как типичного представителя полос, по которым осуществляется основное движение потоков по координируемому маршруту;

– определить количество транспортных средств, пребывающих на эту полосу за время длительности цикла данного плана координации и планирующих следовать по координируемому маршруту;

– в предположении равномерности (одинаковости интервала) прибытия на построенном графическом представлении плана координации отметить на линии развертки точки, соответствующие моментам прибытия этих транспортных средств (при этом размещение рекомендуется производить так, чтобы (в каждом цикле) одно из этих транспортных средств прибывало в самый последний момент горения разрешающего движение сигнала);

– в порядке, соответствующем прибытию транспортных средств (начиная с первого прибывающего на запрещающий движение сигнал), для каждого такого транспортного средства построить траектории движения точки, представляющей передний край транспортного средства, с учетом типичных/«средних» габаритов последнего, и соответственно, геометрических размеров образующихся очередей (наподобие тех, что представлены на рис. 4, рис. 8);

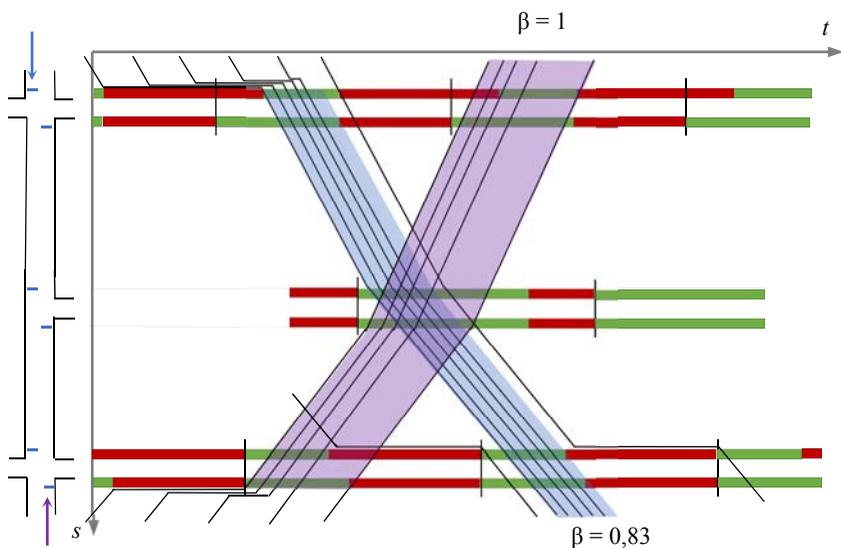


Рис. 8

– оценить путем непосредственного подсчета количества проехавших без остановки транспортных средств соответствующий коэффициент безостановочной проходимости.

5.3.8. Рассмотреть возможность улучшения результативности найденного плана за счет изменения длительности сигналов сигнальной диаграммы (как правило, за счет изменения длительности разрешающих движение сигналов в координируемых направлениях), при этом не забывая анализировать (в том числе с помощью частичного обращения к 3 задаче 2-го класса), насколько подобные манипуляции могут сказаться на реализуемости плана.

Примечание 2. Базовые качественные показатели плана координации касаются исполнения следующих требований к плану:

– лента проезда должна начинаться с начала интервала разрешающего движение сигнала (запрещающий движение сигнал приводит к образованию «пачки». Соответственно, первая часть горения разрешающего движение сигнала оказывается более «нагруженной» движением, чем остальная. Как следствие – ленты, начала которых захватывают начальную часть горения разрешающего движение сигнала, априори обладают значительно большим эффектом);

– передний край ленты проезда не должен проходить по самому началу включения разрешающих движение сигналов на остальных светофорных объектах (из-за скапливания очередей на запрещающем движении сигнале требуется еще некоторое время (равное времени разъезда очереди) для освобождения стоп-линии для сквозного движения координируемой «пачки»). Если его не выдерживать, координируемая «пачка» будет остановлена, что приведет к значительному снижению эффекта).

Примечание 3. При оценке качества плана координации по лентам проезда зачастую полезным бывает использовать следующее соображение (помогающее «забраковать» вариант плана на начальном этапе и тем самым сэкономить время). Пусть на входном для участка координации светофорном объекте будет ситуация, как на рис. 9.

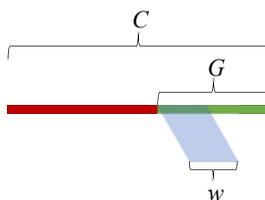


Рис. 9

Необходимо оценить максимально возможное значение коэффициента безостановочного проезда. Если обозначить через q интенсивность прибытия автомобилей, собирающихся проследовать по координируемому маршруту, то длительностью цикла таких автомобилей будет $Q_0 = q \cdot C$. Количество же тех из них, которые смогут безостановочно проследовать по маршруту (после въезда в участок) Q_1 , как легко сообразить, не превосходит количества тех, кто либо прибудет на запрещающий движение сигнал (и тогда после ожидания разрешающего движение сигнала они начнут движение, сразу попадая в ленту), либо прибудет в промежуток длительности «окна» попадания в ленту проезда. Итого, $Q_1 \leq q \cdot (C - G + w)$. Тогда, с учетом того, что $\beta = Q_1/Q_0$, окончательно получается

$$\beta \leq 1 - \lambda(1 - \alpha),$$

где $\lambda = G/C$, $\alpha = w/G$.

Таким образом, можно по величинам λ , α получить верхнюю оценку коэффициента безостановочной проходимости, а значит (если он неприемлемо маленький), понять, имеет ли смысл дальнейшая работа с этим вариантом плана координации.

Примечание 4. Для ускорения подбора сдвигов по циклу сигнальных диаграмм, дающих приемлемый по лентам проезда план координации, имеет смысл поступить следующим образом:

– условно исключить из рассмотрения все светофорные объекты, кроме тех, с которых должны стартовать ленты проезда;

– путем изменения сдвигов одного из оставшихся световых объектов, например, находящегося внизу, добиться оптимальной ленты для движения с другого («сверху–вниз»), после чего попытаться путем малых изменений этого найденного варианта улучшить ситуацию с лентой проезда в обратном направлении («снизу–вверх»). Если выясняется, что это невозможно сделать, значит, при заданном цикле регулирования построить приемлемый план невозможно. В случае же удачного подбора следует на следующем этапе вернуть в рассмотрение исключенный светофорный объект и попытаться найти подбором сдвиги для этого объекта (при необходимости изменения уже найденные сдвиги остальных).

Примечание 5. Необходимо заметить, что при изменении плана координации за счет выбора другой длительности цикла регулирования, поскольку диаграммы светофорного регулирования в этом случае предполагается изменять в основном процедурой перемасштабирования, это значит, что новые развертки сигналов будут отличаться от тех, что были в предыдущем плане, большей частью только на некоторый масштабный коэффициент (будут сжиматься или растягиваться по времени). С другой стороны, траектории движения при этом остаются практически без изменения. Зная это, можно, попрактиковавшись, начать предсказывать, в какую сторону следует изменять длительность цикла (растягивать или сжимать развертки сигналов), чтобы улучшить ситуацию с попаданием траекторий на разрешающие движение сигналы.

3. Оценка реализуемости построенного плана координации

Для того, чтобы оценить, насколько найденный план координации реализуем по соображениям отсутствия критических негативных по-

следствий от его работы в виде роста аварийности и образования заторовых ситуаций, необходимо как минимум проанализировать:

1) отсутствие проблем с безопасностью, которые могли появиться в результате изменения диаграмм светофорного регулирования (выдержанность переходных интервалов, минимальных времен, отсутствие «ловушек желтого сигнала», неперевышение терпеливого времени ожидания и т. п.);

2) отсутствие проблем, связанных с пропускными способностями. Здесь в общем случае нужно проводить отдельно анализ для случаев потоков, движущихся в конфликте (как, например, повороты налево «на просачивание») и бесконфликтном режиме. И если для первого в каждой конкретной ситуации этот анализ типично нужно проводить отдельно, то для второго такой анализ довольно стандартен и типично опирается на расчет оценочных коэффициентов загрузок полос. Здесь нужно отметить, что для проведения соответствующего расчета требуется знать распределение интенсивности транспортного спроса не только по направлениям, но и по полосам. В первом приближении для этого имеет смысл использовать подход, опирающийся на поиск распределения по принципу «равномерности времен проезда» (равновесие Нэша по времени проезда), а именно, интенсивности спроса в каждом направлении должны быть распределены по полосам так, чтобы среднее время проезда (с учетом очередей) в этом направлении по любой полосе, разрешающей движение в заданном направлении, было одинаково (иными словами, чтобы водителю не выгодно было менять полосу на другую). Соответствующее распределение можно делать вручную (методом итераций) либо с помощью программных средств. Вариант алгоритма распределения можно найти в прил. Г.

4. Определение технологических привязок ПК для заданных технических средств организации координированного регулирования

Задание технологических привязок плана координации зависит от технологий, на базе которых предполагается реализовывать соответствующее управление. Для характерного для постсоветского пространства случая, когда таковой выступает система центрального координированного управления наподобие системы «СТАРТ»

(на базе технологии потактового управления светофорной сигнализацией), обычно предполагается, что в проекте программного управления дорожным контроллером изначально прописывается коллекция тактов (фаз), которые могут быть вызваны на обработку из внешнего источника управления (из центра управления). Соответственно, координация светофорных объектов осуществляется за счет подачи (типично ежесекундной) дорожному контроллеру команды на вызов того или иного такта из коллекции. Поскольку при подаче команды на вызов очередного такта, контроллер не может ее выполнить мгновенно из-за необходимости обработки промежуточного такта, то обычно ведут речь не о вызове такта, а о вызове «фазы», и, соответственно, учитывают задержку исполнения команды переключения при формировании соответствующих привязок. Последние представляются в виде «таблицы вызовов», где прописывается на каких секундах должна происходить смена варианта команды запроса такта. Например, если имеется ПК, в котором требуется для заданного светофорного объекта обеспечить сигнальную диаграмму, наподобие представленной на рис. 10 (со сдвигом по циклу $\phi = 5$ с), то соответствующая таблица вызовов будет иметь вид, наподобие табл. 1.

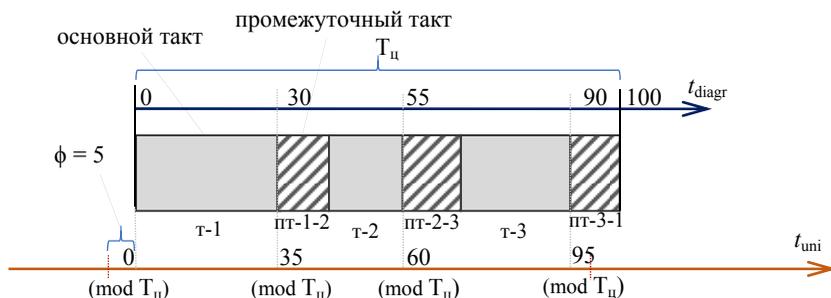


Рис. 10

Таблица 1

ПК	1			
$T_{\text{ц}}, \text{с}$	100			
СФО	ул. Инженеров–ул. Строителей			
$t_{\text{выз}} (\text{mod } T_{\text{ц}}), \text{с}$	95	35	60	
N фазы/ЛФУ	1	2	3	

Примечание 6. В случае необходимости совмещения координированного управления с алгоритмами местного гибкого регулирования, такая технология позволяет в определенное время «давать самостоятельность контроллеру», а именно, предполагается, что помимо команд вызова тактов (фаз) в таблицах вызовов может также указываться команда «ЛУ» («локальное управление»), предписывающая дорожному контроллеру вернуться к работе по своим собственным программам. Как раз в этом временном окне, когда контроллер работает по собственной программе, он может успеть отработать необходимые действия для алгоритма гибкого регулирования, после чего центр вновь возьмет на себя управление и начнет слать команды вызова тактов (фаз). Например, если бы было нужно, чтобы при наличии запроса на обслуживание от пешехода вместо третьего такта включался некоторый новый (скажем, четвертый), который бы содержал в себе обслуживание пешеходов, то есть осуществлялось переключение как на рис. 11, то (при некоторых дополнительных оговорках, связанных с требованием к минимальной длительности $t-4$ и максимальной длительности $пт-4-1$) таблица вызовов выглядела бы наподобие табл. 2.

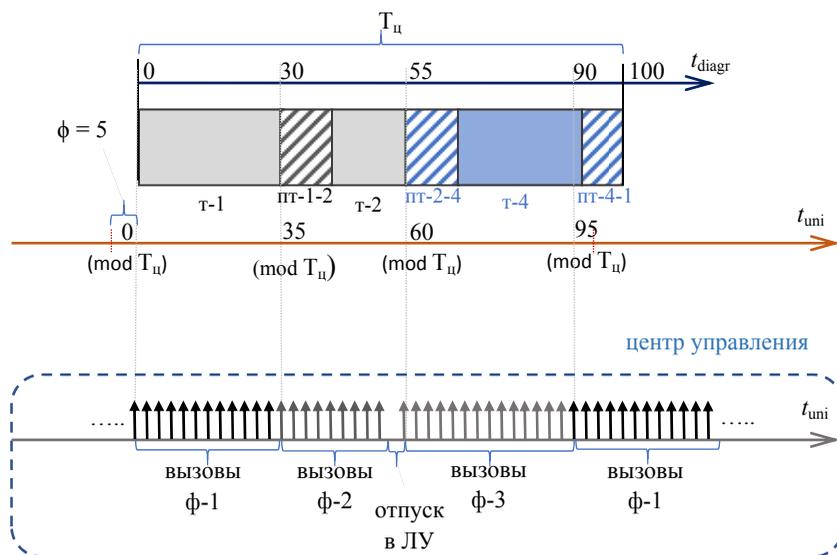


Рис. 11

Таблица 2

ПК	1				
$T_{ц}, c$	100				
СФО	ул. Инженеров–ул. Строителей				
	$t_{выз} \pmod{T_{ц}}, c$	95	35	$60(-3)^3$	60
	N фазы/ЛУ	1	2	ЛУ	3

Соответствующие команды вызовов фаз из центра управления представлены на рис. 11. Может показаться, что в этом случае контроллер не совсем подчиняется центру, поскольку он не включает т-3, как того требует команда, однако это не совсем так, потому что контроллеру разрешается игнорировать команды из центра на период отработки минимального времени основного такта, а также промежуточного такта, если тот уже начался.

³ Данная запись означает, что команда «ЛУ» должна быть послана за 3 с до «точки бифуркации». Это требование носит технический характер и обусловлено тем, что контроллеру нужно некоторое время, чтобы убедиться в том, что его «отпустили на свободу»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Врубель, Ю. А. Организация дорожного движения: в 2 ч. / Ю. А. Врубель. – Минск : Белорусский фонд безопасности дорожного движения, 1996. – 634 с.
2. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 240 с.
3. Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю; пер. с англ. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
4. Иносэ, Х. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамада; пер. с англ. – М. : Транспорт, 1983. – 248 с.
5. Капский, Д. В. Автоматизированные системы управления дорожным движением / Д. В. Капский [и др.]. – Минск : Новое знание, Инфра-М, 2015. – 384 с.
6. Капитанов, В. Т. Управление транспортными потоками в городах / В. Т. Капитанов, Е. Б. Хилажев. – М. : Транспорт, 1985. – 94 с.
7. Kamil Rajdl,* Petr Lansky, and Lubomir Kostal, Fano Factor: A Potentially Useful Information: Front Comput Neurosci. 2020; 14: 569049
8. May, Adolf D.(Adolf Darlington) Traffic flow fundamentals. – Prentice-Hall, 1990. – 464.
9. Печерский, М. П. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах / М. П. Печерский, Б. Г. Хорович. – М. : «Транспорт», 1979. – 172 с.
10. Системы и средства автоматизированного управления дорожным движением в городах / Е. Б. Хилажев [и др.]. – М. : Транспорт, 1984. – 183 с.
11. Врубель, Ю. А. Координированное управление дорожным движением : монография / Ю. А. Врубель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2011. – 230 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Специфика измерения базовых характеристик оперативной дорожно-транспортной ситуации для построения плана координированного регулирования

Общие замечания

Измерения всегда проводятся только после того, как определена ситуация (основного⁴) исследования.

Перед измерением необходимо четко представлять величины, которые предстоит измерять. Кроме того, необходимо выделить *интервал постоянства дорожно-транспортной (Д-Т) ситуации* – временной интервал, в течение которого в соответствии с ситуацией (основного) исследования можно полагать, что характеризующие дорожно-транспортную ситуацию величины могут рассматриваться как стационарные (не меняющие свои вероятностные характеристики) случайные колебания около некоторого неизменного на этом интервале «среднего» значения (рис. А1).

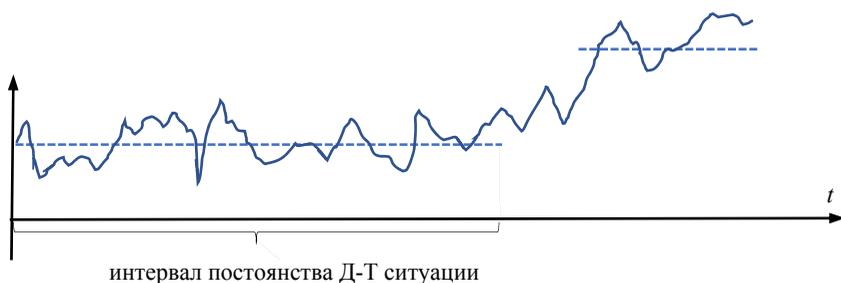


Рис. А1

⁴ То есть исследования, для достижения целей которого и потребовалось организовать отдельную задачу измерения

Измерения можно проводить только в рамках этого интервала.

Типичными, подлежащими измерению характеристиками такой величины U_t являются:

1. Числовые характеристики:

– характеристики «среднего» (такие как, например, матожидание MU , медиана $MedU$ и др.);

– характеристики колебаний (такие как, например, среднеквадратическое отклонение, индекс дисперсии $VMRU$ (Variance-to-Mean Ratio), интерквартильный размах $IRQU$ и др.).

2. Функциональные характеристики:

– функция распределения вероятностей – $F_U = F_U(u)$, функция плотности распределения вероятностей.

Стандартным способом для получения информации об этих характеристиках является *метод статистического оценивания*, состоящий, как известно, в том, чтобы:

1) на интервале постоянства Д-Т ситуации выбрать N моментов времени, случайные величины U_t в которых можно считать достаточно некоррелированными/независимыми между собой;

2) в привязке к этим моментам провести N замеров значений случайной величины U_t , в результате чего получить так называемую выборку u_1, u_2, \dots, u_N ;

3) путем обработки выборки с помощью той или иной процедуры статистического оценивания получить оценки (приближенные значения) нужных характеристик. Среди наиболее известных из них можно выделить:

– процедура точечного оценивания матожидания:

$$\hat{MU} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k, \quad (A1)$$

– процедура точечного оценивания индекса дисперсии:

$$VMRU = \frac{s_0^2}{\hat{MU}}, \quad \text{где } s_0^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (u_k - \hat{MU})^2, \quad (A2)$$

Замечание. Для дополнительного получения гарантированных с вероятностью $1-\alpha$ сведений об относительной неопределенности⁵ полученных оценок можно использовать (при достаточно больших размерах выборки):

$${}^r\delta_{1-\alpha}[\hat{M}U] = T_{N-1}\zeta_{1-\alpha/2} \cdot \frac{s_0}{\sqrt{N}} / \hat{M}U,$$

$${}^r\delta_{1-\alpha}[V\hat{M}RU] = \frac{N-1}{\chi^2_{N-1}\zeta_{\alpha/2}} - 1,$$

где ${}^D\zeta_p T_{N-1}\zeta_{1-\alpha/2}$ – квантиль уровня p распределения вероятностей D (T_K, χ^2_K – распределение Стьюдента и распределение Хи-квадрат с K -степенями свободы соответственно);

– процедура точечного оценивания функции распределения вероятностей так называемая *эмпирическая функция распределения*:

$$\hat{F}_U(u) = \frac{\text{количество } u_k \leq u}{N}. \quad (\text{A3})$$

Как известно, эти процедуры дают тем точнее приближение, чем больше N . В подобных ситуациях абсолютная ошибка оценивания уменьшается со скоростью порядка $1/\sqrt{N}$. Если взглянуть на график этой функции (рис. A2) для случая, когда выборка небольшая (ее размер не превосходит 100), то можно увидеть, что скорость убывания ошибки значительно замедляется, начиная со значений $N \approx 15$, и перестает давать какой-то значительный вклад в снижение ошибки где-то на $N \approx 50$. По этой причине зачастую можно встретить для малых выборок негласное правило «работать с выборкой из не менее 15 значений, а в идеале – не менее 50».

⁵ *относительная неопределенность оценки*: ${}^r\delta[\hat{x}] = |x^\circ - \hat{x}|/\hat{x}$, где x°, \hat{x} – оцениваемая величина и ее оценка соответственно

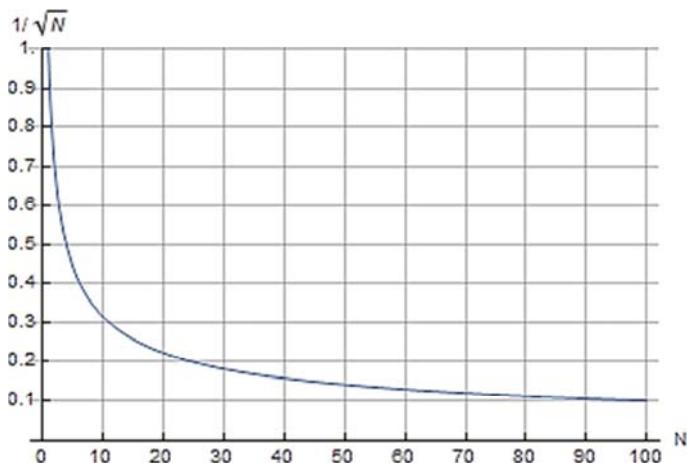


Рис. А2

Измерение характеристик спроса

В данном случае измерению подлежат характеристики случайной величины: *интенсивность транспортного спроса (traffic demand rate)*, q в точке проезжей части в заданный момент времени – отношение количества транспортных средств, желающих проехать через рассматриваемую точку, к промежутку времени, в течение которого поток из этих транспортных средств, проходящих данную точку, может рассматриваться (в заданной ситуации исследования) как непрерывный и постоянный.

Замечание. Это понятие не включает скрытого (потенциального) спроса, а только спрос со стороны транспортных средств, непосредственно находящихся в транспортной сети в данный момент времени. Следует также отметить, что если транспортный спрос не превосходит пропускной способности, то его значение фактически будет совпадать с величиной интенсивности транспортного потока. Однако, в случае обратной ситуации эти величины уже будут отличны (и в этом случае следует избегать оценивания величины транспортного спроса на основе величины интенсивности транспортного потока).

Поскольку для целей основного исследования важно поведение этой величины на малых масштабах времени – порядка десятков секунд – важно обратить внимание на следующее:

поскольку данный масштаб сравним по порядку с типичными интервалами между появлением спроса от отдельных участников движения, то поток из этих транспортных средств не может в этом случае уже рассматриваться как непрерывный, а значит, исходное понятие интенсивности спроса перестает быть однозначно определенным (и соответственно, величину нельзя измерить). Другими словами, на этом масштабе интенсивность спроса перестает существовать как измеряемая физическая величина. Однако, чтобы не отказываться от этого удобного понятия, имеет смысл для этих масштабов ввести эффективную интенсивность спроса, а именно:

пусть Q_T – *объем транспортного спроса (traffic demand volume)* в точке проезжей части за некоторый выделенный промежуток времени T (рассматриваемое за этот промежуток времени количество транспортных средств, желающих проехать через эту точку). Тогда под *эффективной (за промежуток T) интенсивностью спроса* имеет смысл понимать величину $q = Q_T / T$.

Замечание. Как видно из определения, эффективная интенсивность спроса, в отличие от обычной, зависит еще и от длительности промежутка, к которому она привязана. Поэтому перед использованием этой величины важно выбрать и зафиксировать соответствующий промежуток. Как видится, имеет смысл выбрать в качестве последнего *опорный* период времени T^o – минимальное значение периода, меньше которого в данной ситуации исследования не имеет смысла рассматривать, поскольку колебания спроса на меньших промежутках несущественны для целей исследования.

С учетом сказанного измерение эффективной интенсивности спроса можно строить на основе измерения объема спроса. И тогда, окончательно в качестве процедуры измерения характеристик интенсивности спроса можно рассматривать процедуру:

1) выделить на интервале постоянства Д-Т ситуации не менее $N \approx 15$ интервалов длительностью T^o , таких, что соответствующие им величины Q_{T^o} можно было бы считать достаточно некоррелированными между собой;

2) на этих интервалах провести замеры значений величины Q_{T^o} , получив тем самым выборку размера N ;

3) учитывая очевидные соотношения между характеристиками эффективной интенсивности q и объемом спроса Q_{T^o} , в частности,

$$Mq = MQ_{T^o} / T^o, \quad VMRq = VMRQ_{T^o} / T^o, \quad (A4)$$

произвести окончательные расчеты статистических оценок:

$$\hat{M}q, \quad {}^r \delta_{1-\alpha}[\hat{M}q],$$

$$VMR\hat{q}, \quad {}^r \delta_{1-\alpha}[VMR\hat{q}],$$

где уровень доверия $1 - \alpha$ имеет смысл выбирать, исходя из соображений оптимальности (для целей исследования) соотношения – достоверность/неопределенность, поскольку чем выше требование к достоверности, тем, как следует ожидать, будет выше неопределенность оценки. В качестве ориентировочного, как видится, имеет смысл рассматривать уровень доверия 0,75 (75 %) (некая середина между крайними случаями – оценками с предельно низкими уровнями 0,5–0,6 и оценками с предельно высокими уровнями 0,9–0,99).

Замечание. В некоторых ситуациях может оказаться, что изменить величины Q_{T^o} для периода T^o затруднительно, тогда как это можно достаточно легко сделать для некоторого другого периода T' (такая ситуация встречается при измерениях на регулируемом перекрестке, где в качестве T' выступает длительность цикла регулирования). В этом случае, если задача измерения ограничивается измерениями величин Mq и $VMRq$, можно поступить следующим образом.

Если предположить, что поток прибытий к заданной точке транспортных средств таков, что объем спроса Q_T растет пропорционально величине промежутка T (что обычно естественно ожидать от транспортных потоков⁶), то значит (как следует из свойств матожидания и дисперсии) и MQ_T , и $VMRQ_T$ растут пропорционально T , откуда с учетом соотношений (0,4) вытекает, что Mq

⁶ Согласно теории (см., например, [7, 11]), такую ситуацию можно во многих случаях ожидать для промежутков с $MQ_T \gg 1$

и $VMRq$ не будут сильно зависеть от того, были вычислены они по Q_{T^o} или Q_{T^*} . Таким образом, в этом случае появляется дополнительная свобода в выборе опорного промежутка. И это одна из причин, почему индекс дисперсии VMR предпочтителен другим величинам, характеризующим колебания.

Измерение характеристик скорости движения

Для построения координированного регулирования с организацией лент безостановочного движения, как известно, необходимо иметь сведения о времени движения транспортных средств от стоп-линии одного светофорного объекта до стоп-линии другого. Естественной величиной, несущей в себе эту информацию, является *среднепутевая скорость* v_{cn} как отношение пути ко времени, за которое этот путь был пройден. Или, что то же самое – величина постоянной скорости, двигаясь с которой по тому же пути, можно было бы его пройти за то же самое время.

Пользуясь определением, не составляет большого труда произвести измерение значения этой величины – для этого достаточно измерить время движения транспортного средства (в большинстве случаев из-за малых расстояний между светофорными объектами это можно сделать путем прямого наблюдения за движением транспортного средства), после чего, зная величину пути, произвести соответствующий расчет.

Однако, поскольку эта величина является случайной (ее значения при проездах одного и того же участка транспортными средствами даже одного и того же типа будут в общем случае случайным образом различаться), то для ее описания нужно привлекать вероятностные характеристики. В первую очередь здесь важно подчеркнуть, что поскольку v_{cn} обратно пропорциональна случайному времени движения τ , то в общем случае опасно использовать в качестве характеристик такой величины матожидание и дисперсию, поскольку они могут попросту не существовать (быть бесконечными), как это зачастую бывает у подобного рода обратных величин.

По этой причине и с учетом того, что получить достаточно большую по объему выборку значений v_{cn} не представляет труда,

имеет смысл в качестве основной характеристики рассматривать эмпирическую функцию распределения (кумулятивную диаграмму скоростей). В качестве же числовых характеристик распределения имеет смысл рассматривать медиану и интерквартильный размах как наиболее простых представителей «центра распределения» и «размаха разброса значений». В качестве графического представления соответствующей информации обычно используется *диаграмма размаха* (*box-and-whiskers diagram*).

Тогда, в качестве процедуры измерения характеристик скорости движения можно рассматривать процедуру:

на интервале постоянства дорожно-транспортной ситуации для каждого отдельного перегона между светофорными объектами, с границами от стоп-линии до стоп-линии по ходу движения:

1) произвести не менее 50 измерений времен прохождения рассматриваемого перегона наиболее представительными (для организации координации) транспортными средствами.

Замечание. При этом следует обратить внимание на следующее:

– следует исключать из измерений ситуации, когда время проезда перегона существенно увеличивается из-за снижения скорости при подъезде к светофору с включенным запрещающим движением сигналом. Это можно сделать либо выполняя измерения только при наличии разрешающего движения сигнала на соответствующем светофоре, либо путем сокращения участка измерения до границ, когда еще нет существенного влияния сигналов светофора на скорость движения, с проведением последующей экстраполяции этого движения;

– для перегонов, начинающихся с крайних для всего участка координации стоп-линий, в измерения обязательно должны включаться транспортные средства, начинающие свое движение из положения полной остановки, тогда как для остальных перегонов такие транспортные средства должны обязательно исключаться из рассмотрения;

2) на основе известных данных о длинах путей движения, путем проведения соответствующих расчетов, получить выборку значений среднепутевых скоростей. После чего по ней произвести окончательные расчеты статистических оценок, представленных в виде диаграмм кумулятивных кривых и диаграмм размаха:

$$\hat{F}_{v_{cn}} = \hat{F}_{v_{cn}}(v), \text{Mêd } v_{cn}, \text{IR}Q_{v_{cn}}.$$

Приведение оперативной ситуации по вариации транспортно-пешеходного спроса

Приведение оперативной ситуации по вариации транспортно-пешеходного спроса предполагает выбор такого варианта транспортно-пешеходного спроса, при котором специфика случайного характера реального (фактического) спроса была бы несущественной в рассматриваемой ситуации исследования⁷. Такой подход обычно позволяет намного упростить расчеты за счет того, что в таком случае единственной специфической характеристикой ситуации выступает только характеристика неслучайной составляющей спроса, а именно, «средняя» интенсивность.

Для выбора соответствующей интенсивности имеет смысл использовать следующие соображения:

а) поскольку необходимо избавиться от специфики случайных колебаний спроса, необходимо реальную ситуацию свести к некоторой эквивалентной «эталонной» с точки зрения характера случайных колебаний ситуации;

б) поскольку в случае, когда речь идет о регулируемых пересечениях, в первую очередь внимание уделяется отсутствию ситуаций, когда водители вынуждены ожидать проезда пересечения более двух циклов⁸ (или, что то же самое, когда к началу нового цикла от предыдущего остается очередь, превышающая двойную цикловую пропускную способность), то имеет смысл в качестве соответствующих эквивалентных рассматривать ситуации, расчеты по которым давали бы такие же или по крайней мере не заниженные прогнозные показатели для остаточных очередей, какие давали бы расчеты и по исходной ситуации;

в) типичной «эталонной» является ситуация, при которой дисперсия случайных колебаний равна величине матожидания, или, что

⁷ Это вовсе не означает, что спрос при этом считается полностью неслучайным. Это означает, что нужные расчеты могут быть проведены уже на основе информации, ограниченной только данными о неслучайной составляющей транспортного спроса.

⁸ Что воспринимается водителями как заторовая ситуация и значительно увеличивает недовольство и напряженность

то же самое, при которой коэффициент дисперсии колебаний равен единице (что, как известно, характерно для широко используемого в расчетах пуассоновского спроса).

С учетом этих соображений задача выбора соответствующей эквивалентной ситуации выглядит следующим образом.

Пусть T^o – опорный период времени для планируемого исследования (минимальное значение периода, меньше которого в данной ситуации исследование не имеет смысла рассматривать, поскольку колебания спроса на меньших промежутках несущественны для целей исследования).

Замечание. С учетом высказанных ранее соображений, в качестве такого периода естественным образом выступает минимальный период, специфика колебаний спроса в течение которого существенным образом влияет на рассматриваемую величину остаточной очереди. Типичным кандидатом на соответствующий период является длительность цикла диаграммы светофорного регулирования, для оценки функционирования по которой и выбирается расчетная ситуация. Однако, если это значение заранее неизвестно (что характерно для подобного рода исследований), то в качестве T^o имеет смысл выбрать минимальную из диапазона предполагаемых (по некоторым дополнительным соображениям) допустимых длительностей цикла.

Q_{T^o} – объем транспортного спроса за промежуток T^o со стороны участников движения определенного типа на прохождение регулируемого пересечения по определенному геометрическому направлению движения.

Если рассматривать Q_{T^o} на разных периодах как независимые случайные величины, то (при не слишком малых интенсивностях спроса), как следует из теории вероятностей, эти величины можно рассматривать как распределенные по нормальному закону с математическим ожиданием MQ_{T^o} и среднеквадратичным отклонением $\sigma(Q_{T^o})$.

Тогда пункты а–в можно переформулировать в следующем виде:

– заменить исходные случайные величины Q_{T^o} на некоторые $Q_{T^o}^3$ так, чтобы:

величины остаточных очередей, рассчитанные по $Q_{T^0}^3$, были не меньше таковых, рассчитанных по Q_{T^0} ;

индекс дисперсии $\sigma^2(Q_{T^0}^3)/M Q_{T^0}^3$ был равен единице (либо был меньше).

В качестве одного из возможных вариантов решения этой задачи можно рассматривать введение случайных величин $Q_{T^0}^3$, имеющих распределение вероятностей, представленное на рис. Б1 (закрашено сплошным цветом).

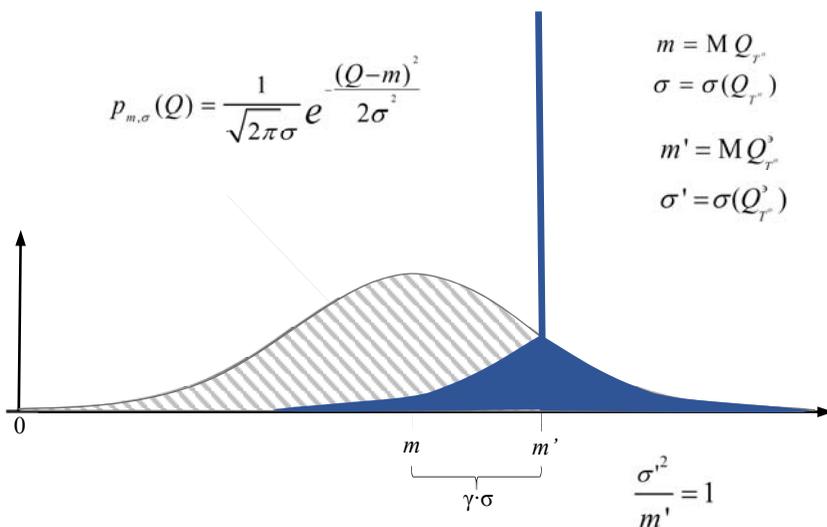


Рис. Б1. Распределения вероятностей величин Q_{T^0} исходного спроса (заштриховано) и $Q_{T^0}^3$ приведенного (закрашено сплошным)

Действительно, в этом случае матожидание такого распределения m' не ниже матожидания m исходного, а значит, проектная пропускная способность, подготавливаемая по m' , не будет занижена. Далее, поскольку распределение вероятностей колебаний, превосходящих матожидание m' у приведенного и исходного распределений совпадают, это значит, что проектная оценка остаточ-

ных очередей по приведенному спросу также не будет занижена. Что и требовалось.

Непосредственное выражение для матожидания m' соответствующего распределения может быть найдено из условия равенства его относительной дисперсии единице. Если для удобства принять $m' = m + \gamma\sigma$, $\gamma \geq 0$, то соответствующее уравнение относительно неизвестного γ можно тогда представить в следующем компактном виде:

$$(1 + \gamma^2)(1 - \Phi(\gamma)) - \frac{e^{-\frac{\gamma^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}\gamma = \frac{1}{2VMR}, \quad (B1)$$

где Φ – функция распределения стандартного нормального закона; VMR – коэффициент дисперсии исходного спроса.

График зависимости решения от индекса дисперсии представлен на рис. Б2.

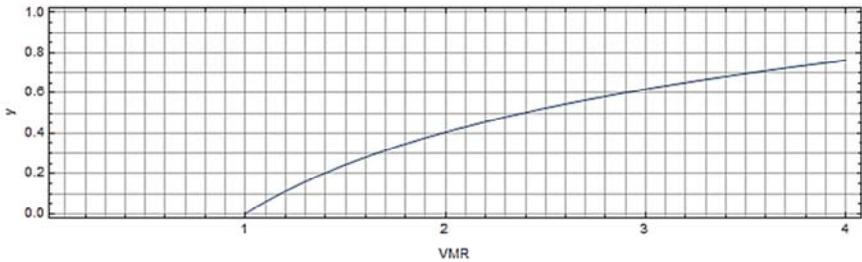


Рис. Б2. График зависимости решения уравнения (B1) от индекса дисперсии VMR

Аналитическое выражение для приближенного решения, достаточно хорошо согласующееся с решением, представленным на графике, выглядит следующим образом:

$$\gamma \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{\pi} + \frac{4 - \pi}{A} - A \right), \quad (B2)$$

где

$$A = \left(B + \sqrt{B^2 + (4 - \pi)^3} \right)^{1/3}, \quad B = \sqrt{\pi} \left(\frac{3}{VMR} - (\pi - 3) \right).$$

С учетом сказанного и того, что имеют место быть очевидные соотношения $MQ_{T^o} = Mq \cdot T^o$, $\sigma(Q_{T^o}) = \sqrt{VMR \cdot Mq \cdot T^o}$, где Mq – матожидание фактической эффективной (за промежуток T^o) интенсивности спроса, окончательно получается:

$$Mq^3 = Mq + \gamma \sqrt{VMR \cdot \frac{Mq}{T^o}}, \quad (B3)$$

$$VMR^3 = 1,$$

где γ выбирается как решение уравнения (B1) (в качестве которого можно использовать приближение (B2)).

**Выбор расчетной оперативной
дорожно-транспортной ситуации**

Выбор расчетных характеристик спроса

Исходными данными для выбора расчетной ситуации являются полученные данные в результате измерений оценки характеристик фактической/реальной ситуации, с некоторым заранее выбранным уровнем доверия $1 - \alpha$, к которым относятся (см. прил. А):

$$\hat{M}q, {}^r \delta_{1-\alpha}[\hat{M}q],$$

$$V\hat{M}Rq, {}^r \delta_{1-\alpha}[V\hat{M}Rq].$$

Поскольку эти оценки интенсивности и индекса дисперсии в общем случае имеют ненулевую неопределенность, в качестве первых кандидатов на расчетные характеристики имеет смысл рассматривать такие величины, которые бы учитывали эту неопределенность и тем самым гарантировали (с вероятностью $1 - \alpha$) отсутствие негативных последствий от их использования в расчетах. Для этого, как легко понять, достаточно выбрать «наихудший вариант ситуации», а именно, максимально возможные с учетом неопределенности значения:

$$Mq^{\uparrow} = \hat{M}q \cdot \left(1 + {}^r \delta_{1-\alpha}[\hat{M}q]\right),$$

$$VMRq^{\uparrow} = V\hat{M}Rq \cdot \left(1 + {}^r \delta_{1-\alpha}[V\hat{M}Rq]\right).$$

Кроме того, если предполагается не включать в явном виде в расчеты специфику колебаний транспортного потока, то необходимо также выполнить приведение интенсивности по вариации (см. прил. Б).

Итоговую схему подготовки расчетной ситуации можно наглядно представить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \hat{M}q \\ r \delta_{1-\alpha}[\hat{M}q] \\ VMRq \\ r \delta_{1-\alpha}[VMRq] \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{учет неопределенности}} \begin{bmatrix} Mq^{\uparrow} \\ VMRq^{\uparrow} \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{приведение по вариации}} \begin{bmatrix} Mq^{\uparrow\exists} \\ VMRq^{\uparrow\exists} \leq 1 \end{bmatrix}$$

Выбор расчетных характеристик скорости движения

Касательно выбора расчетных среднепутевых скоростей движения, производить соответствующий выбор имеет смысл, опираясь на эмпирическую функцию распределения (кумулятивную диаграмму). Поскольку она фактически показывает долю транспортных средств, движущихся со скоростями, не превышающими заданной, и поскольку задача – выбрать в качестве расчетной такую скорость, которую смогло бы поддержать наибольшее количество участников, то имеет смысл отталкиваться от следующих соображений:

поскольку водители могут всегда снизить скорость движения, но не всегда могут ее увеличить (по многим обстоятельствам, начиная с особенностей условий движения и оканчивая скоростными характеристиками транспортных средств), то изначально целесообразно отталкиваться от медианной скорости (которая гарантирует, что по меньшей мере половина участников будет способна ее придерживаться), с последующим возможным увеличением, если есть основания считать, что такое повышение не понизит процент участников, способных ее поддержать (по крайней мере в будущем, в условиях реализованного координированного регулирования).

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Итеративный алгоритм прогнозирования распределения транспортного спроса по полосам

Пусть для рассматриваемого входа пересечения, для которого предполагается найти распределение спроса по полосам, заданы:

1) интенсивности транспортного спроса с рассматриваемого входа по направлениям и типам транспортных средств, например, как в табл. Г1;

Таблица Г1

Направление		Интенсивность спроса (по типам), авт/ч		
Вход	Выход	л	г	а
А	А	0	0	0
	В	72	18	0
	С	360	36	9
	Д	180	0	0

2) специфика организации движения по каждой из полос, а именно:
– разрешенные направления движения с полосы для каждого типа транспортного средства, например, как на рис. Г1, в предположении, что отсутствуют специфические ограничения для отдельных типов транспортных средств;

3) специфика регулирования движения с данного входа, а именно:
– длительность цикла регулирования C ;
– интервалы включения разрешающего движение сигнала по каждому направлению в пределах цикла регулирования, например, как на рис. Г1;

4) косвенные (помимо потери времени в очереди) потери времени при выборе каждой полосы для проезда (например, связанные с последующими перестроениями на выезде);

5) коэффициенты приведения транспортного потока по потоку насыщения (к стандартному);

6) поправочные коэффициенты потока насыщения по маневрам для каждой полосы и направления движения с нее;

7) поправочные коэффициенты потока насыщения по условиям движения с полосы.

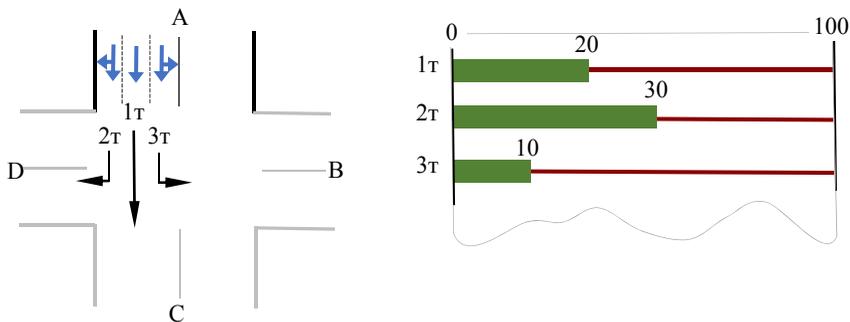


Рис. Г1

С учетом этих данных идею работы алгоритма можно представить следующим образом.

Пусть $q^{(o,k)}$ – интенсивность спроса на движение по направлению на выход o для типа транспортных средств k . Именно эти величины нам нужно уметь распределять по полосам, однако для более естественного изложения алгоритма распределения договоримся вместо них рассматривать (равносильные им) величины циклового объема спроса $q^{(o,k)} \cdot C$ (объема спроса за длительность цикла).

С учетом сказанного, для того чтобы понять, каким образом распределять цикловой объем спроса по полосам, поступим следующим образом:

разобьем этот цикловой объем спроса на n^* частей:

$$\Delta Q^{(o,k)} = q^{(o,k)} \cdot C / n^*,$$

где n^* выберем настолько большим, чтобы объем каждой части был достаточно мал (не превышал 1–2 авто, для этого, достаточно, чтобы $n^* > \max_{o,k} q^{(o,k)} \cdot C / 2$).

При таких малых размерах можно считать, что каждая часть включает не более одного авто, а значит, распределение этой части на ту или иную полосу должно повторять логику выбора полосы водителем. Для описания этой логики имеет смысл ориентироваться на идеализированную ситуацию, когда водитель владеет полной информацией о ситуации и руководствуется принципом выбора по-

лосы, гарантирующей ему минимальную потерю времени. Здесь следует отметить, что поскольку зачастую водитель при выборе полосы руководствуется не только временем, необходимым для разезда очереди τ_Q на этой полосе, но еще и затратами времени $\Delta\tau$, связанными, например, с последующими перестроениями, то в алгоритме имеет смысл ориентироваться на суммарное потраченное на проезд пересечения время, включающее в себя оба этих аспекта.

С учетом сказанного сам алгоритм распределения по полосам можно представить в следующем виде (фактически, воспроизводящем поведение отдельных транспортных средств).

Пусть для хранения промежуточных значений зарезервированы переменные:

$l_n^{(o,k)}$ – количество распределенных на полосу l частей $\Delta Q^{(o,k)}$,

$l\tau_Q$ – время разезда очереди с полосы l .

Тогда псевдокод алгоритма можно представить как

для всех полос $l = 1, 2, \dots$ **выполнить:**

$l_n^{(o,k)} \leftarrow 0$
 $l\tau_Q \leftarrow 0$

конец

для частей $i = 1, 2, \dots, n^*$ **выполнить:**

для всех вариантов $\Delta Q^{(o,k)}$, $o = A, B, \dots$, $k = \lambda, \Gamma, \dots$ **выполнить:**

- из всех разрешенных для движения $\Delta Q^{(o,k)}$ полос найти полосу l^* с минимальным суммарным временем $\tau_\Sigma = l\tau_Q + \Delta\tau^{(o)}$;
- $l_n^{(o,k)} \leftarrow l_n^{(o,k)} + 1$ (то есть распределить на эту полосу $\Delta Q^{(o,k)}$);
- пересчитать $l^*\tau_Q$ (см. процедуру пересчета ниже);

конец

конец

для всех вариантов $l = 1, 2, \dots$, $o = A, B, \dots$, $k = \lambda, \Gamma, \dots$ **выполнить:**

вывести результирующие распределенные объемы
 $lQ^{(o,k)} = \Delta Q^{(o,k)} \cdot l_n^{(o,k)}$ (либо $l_q^{(o,k)} = lQ^{(o,k)} / C$).

конец

Процедура расчета времени ${}^l\tau_Q$ предполагает последовательное выполнение следующих шагов:

1) рассчитать приведенный по потоку насыщения к легковым, движущимся без маневров в стандартных условиях, транспортным средствам накопившийся (из распределенных на данную полосу частей) объем:

$${}^lQ^{(*)} = \sum_o \sum_k {}^l n^{(o,k)} \cdot \Delta Q^{(o,k)} \cdot K_s^{(k)} \cdot K_m^o \cdot K_l,$$

где $K_s^{(k)}$ – коэффициент приведения по потоку насыщения к легковым транспортным средствам;

K_m^o – поправочные коэффициент потока насыщения по маневрам (при движении в направлении на выход o);

K_l – поправочный коэффициент потока насыщения по условиям движения с полосы;

2) рассчитать время разъезда очереди:

$${}^l\tau_Q = \frac{{}^lQ^{(*)}}{s_0} + \delta t^{loss} + [{}^lx] \cdot C,$$

$${}^lx = \frac{{}^lQ^{(*)}}{s_0 ({}^lIG - \delta t^{loss})},$$

где s_0 – стандартный поток насыщения;

δt^{loss} – максимальная величина времени, дополнительно теряемого из-за процесса установления потока насыщения (обычно около 3 с);

lIG – длительность интервала, дающего права движения одновременно по всем направлениям, разрешенным для движения с этой полосы (если таковых несколько)⁹, квадратные скобки – операция взятия целой части числа. Последнее слагаемое в выражении для ${}^l\tau_Q$

⁹ Соответствующий интервал будет пересечением интервалов, разрешающих движение каждый по своему направлению

отвечает за дополнительные задержки в случае, когда коэффициент загрузки полосы l_x больше единицы, и соответственно, для разъезда скопившейся очереди требуется ждать еще $\left[l_x \right] \cdot C$ полных циклов.

Соответствующий алгоритм, как видится, легко применить даже в полуавтоматическом режиме, реализуя выбор полосы для очередной части $\Delta Q^{(o,k)}$ вручную, но при этом ориентируясь на автоматическое вычисление времен $l_{\tau_{\Sigma}}$ с помощью, например, электронных таблиц, наподобие табл. Г2.

Замечания. В случае, когда у того или иного направления движения нет альтернативных полос, то есть выделена одна полоса, имеет смысл сразу распределить на нее весь цикловой объем соответствующего транспортного спроса, тем самым ускорив расчет.

В случае, когда по каким-то соображениям заведомо известно, что при соответствующем принципе распределения спроса коэффициенты загрузок на альтернативных полосах не будут превышать единицы, распределение спроса не будет зависеть от специфики регулирования движения. Как следствие, становится не обязательным делать перерасчет распределения для нового варианта диаграммы светофорного регулирования, если заранее известно, что соответствующие условия будут выполнены и для нее.

Таблица Г2

Вариант шаблона для вычисления распределения спроса
(для примера с $n^* = 10$)

		л		г		а										
		ΔQ	n	ΔQ	n	ΔQ	n	K_m	K_l	$Q_n^{(*)}$	IG	C	τ_Q	Δt	τ_{Σ}	
3	↑	0,2		0,05		0,0		1,07	1,0		10	100		0		
	→	1,0		0,1		0,025		1,0						0		
2	→	1,0		0,1		0,025		1,0	1,0		30			0		
1	→	1,0		0,1		0,025		1,0	1,0		20			10		
	↓	0,5		0,0		0,0		1,06					0			

Учебное издание

САРАЖИНСКИЙ Денис Сергеевич
КАПСКИЙ Денис Васильевич

**ПОСТРОЕНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО ПЛАНА
КООРДИНИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ УЧАСТКА УДС**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация
дорожного движения», 1-44 01 06 «Эксплуатация
интеллектуальных транспортных систем
на автомобильном и городском транспорте»

Редактор *Е. О. Германович*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 29.07.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 2,73. Уч.-изд. л. 2,14. Тираж 100. Заказ 495.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

