

Г. А. Тимофеева, А. А. Шевцов

Система согласованного управления транспортными потоками на сложном перекрестке

G. A. Timofeeva, A. A. Shevtsov

Coordinated management system of transport flows at complex intersection

Аннотация

Статья посвящена исследованию и оптимизации системы согласованного управления сложным перекрестком на основе построения имитационной модели. Такой перекресток включает в себя комбинированные геометрические, планировочные (указательные знаки, разметку на проезжей части) и управляющие (светофорное управление, датчики подсчета количества транспортных средств) структуры.

Рост логистической составляющей городов России, увеличение населения, изменение инфраструктуры, повышение автомобилизации побуждают и рост уровня грузо- и пассажиропотоков.

Все это влияет на распределение транспортных потоков, фиксируется на оперативном светофорном регулировании на локальном и глобальном уровнях.

Рассмотрен вопрос выбора оптимального согласованного режима работы светофоров с учетом геометрии перекрестка и анализа основных характеристик, влияющих на эффективность работы комплекса светофорных объектов. Также стоит отметить краткий обзор наиболее распространенных моделей и алгоритмов для исследования поведения транспортных потоков в различных дорожных сетях. Рассмотрено специализированное программное обеспечение для создания имитационных моделей. Произведен анализ зарубежного и отечественного опыта для определения основных этапов моделирования транспортных потоков с последующим применением к реальному исследуемому объекту.

Для построения модели использовались среда Anylogic и оптимизатор OptQuest для оптимизации работы системы согласованного управления; рисунки выполнены с помощью САПР «Компас». Проанализированы различные подходы к выбору оптимальных параметров функционирования управляющей системы.

Ключевые слова: сложный перекресток, имитационное моделирование, оптимизация, согласованное управление.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-4-12-24

Abstract

The article is focused on research and optimisation of the system of coordinated management of a complex intersection based on building a simulation model. Such an intersection includes combined geometric, layout (indicating signs, road marking) structures as well as controlling control, detector units for counting the number of vehicles) ones.

The growth of a logistical component of Russia's cities, rising of population, change of infrastructure, increase in automobilisation provoke rising of the

All these have an impact on allocation of transport and are registered on prompt signalisation on the local and global level.

The issue of selection of optimal coordinated mode of operation is considered taking into account intersection geometry and analysis of basic characteristics, which have an impact on the of operation of complex of facilities. Also, a brief survey of the most common models and algorithms for investigating the behaviour in various road networks is worthwhile to note. Specialized software for building simulation models is given a consideration. The analysis of foreign and domestic experience in the basic stages of modelling of is carried out with further practical use to an actual object under examination.

For building the model, Anylogic environment and OptQuest optimiser were used to streamline the work of a coordinated management system; the were done by means of «Kompas» System of Automated Design. The various approaches to the selection of optimal parameters of management system operation are analysed.

Key words: complex intersection, simulation modelling, optimization, coordinated management.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-4-12-24

Статья рекомендована к публикации А.В. Мартыненко, канд. физ.-мат. наук, доцентом; Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: AMartynenko@usurt.ru.

Галина Адольфовна Тимофеева, д-р физ.-мат. наук, профессор; кафедра «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения; E-mail: Gtimofeeva@usurt.ru.

Александр Александрович Шевцов, аспирант; кафедра «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: aleksandrsevcov561@gmail.com.

The article is recommended for publishing by A.V. Martynenko, Candidate of physical and mathematical sciences, Associate professor; Ural state university of railway transport. E-mail: AMartynenko@usurt.ru

Galina Adol'fovna Timofeeva, Doctor of physical and mathematical sciences, Professor; «Natural-science disciplines» Chair of Ural state university of railway transport; E-mail: Gtimofeeva@usurt.ru.

Aleksandr Aleksandrovich Shevtsov, post-graduate student, «Natural-science disciplines» Chair of Ural state university of railway transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: aleksandrsevcov561@gmail.com.

Для описания транспортных потоков используются различные модели, в том числе гидродинамические, модели клеточных автоматов, имитационные [1, 4, 11, 14], модели следования за лидером, мультиагентные [3, 6, 5]. Важный параметр для гидродинамических, гравитационных, макромоделей – анализ времени перемещения транспортных средств по транспортной сети, например, города или района в достаточно большом масштабе, что позволяет пренебречь конкретной динамикой разгонов-торможений и некоторыми индивидуальными поведением транспорта [1, 5]. Для исследования транспорта и выбора оптимальных режимов работы активно применяются теория графов (задачи Штейнера, алгоритмы Диница), вероятностные модели оптимизации, многокритериальный подход и Парето-оптимальные решения [6], линейное программирование (алгоритм Форда – Фалкерсона, теорема Гофмана – Краскала, алгоритмы Эдмонса – Карпа, алгоритм Карзанова) [1, 5] и др.

При выборе оптимальных решений при проектировании и настройке системы управления транспортными потоками активно используются различные компьютерные системы моделирования. Наиболее известны: PTV Vissim (ведущее программное обеспечение для микроскопического моделирования движения с возможностью отображения всех участников дорожного движения и их взаимодействия в одной модели [5]), Transyt (программный пакет, содержащий макроскопическую модель трафика, программу-оптимизатор длительности разрешающих и запрещающих сигналов, с рабочей областью для создания имитационной модели [1]), Highway Capacity (HCS7), ArteryLite, AnyLogic (инструмент, который представляет мультимедийное имитационное моделирование, с рабочей областью для создания имитационной модели), LISA+.

Эффективность работы городской транспортной сети зависит от эффек-

тивности качества работы и согласованности отдельных компонентов данной сети, транспортных узлов (транспортно-пересадочные узлы, перекрестки, остановки и т.д.). Отметим ряд научных работ, которые посвящены исследованию влияния различных геометрических и инфраструктурных факторов на транспортные потоки [2, 11, 15]. Системы согласованного управления сложными перекрестками и другими транспортными системами создаются на основе имитационной модели исследуемого объекта, в которой применяются датчики случайного появления автомобилей, имитируется движение автотранспортных средств, переключаются разрешающие сигналы светофора, визуализирована карта пробок. Для повышения эффективности работы сложных перекрестков самый удачный вариант – применение различных вероятностных, адаптивных и интеллектуальных методов поиска лучших вариантов длительности разрешающих сигналов фаз [13, 10]. Существуют различные направления в области исследования построения композиции алгоритмов для поиска оптимальных решений [5, 9]. В рамках исследований разработано несколько имитационных моделей, которые применяются для различных адаптивных систем управления и более точного расчета оптимальной длительности, определения востребованных направлений, разработки планов пуска и т.д.

В качестве примеров применения на практике систем согласованного управления можно привести «умные светофоры». В их контроллеры загружают необходимый набор команд или план регулирования перекрестка, который основывается на наборе статистических данных (собираются наблюдениями за интенсивностью потоков автотранспорта). Статистика показывает, в какое время суток автопоток пиковый. Большую роль в организации движения играют и межпиковые состояния потока. Один из важных факторов – выбор из существующих направлений самых востребованных в пиковые или межпиковые

часы, таким направлениям придается большее значение при выборе режимов регулирования.

При оптимизации дорожной структуры, в том числе сложных пересечений, специалисты исследуют проблемы, связанные с образованием пробок и заторов, увеличением числа конфликтных точек, проблемы увеличения количества ДТП и ухудшения экологической составляющей. Условно выделяются три направления исследований: строительное, планировочное, управляющее [7, 8]. В настоящей статье рассмотрены только управляющие решения для оптимизации работы сложного светофорного объекта.

Имитационная система согласованного управления

Оптимизация управления светофорными сигналами на основе имитационной модели рассматривалась в работах [4, 6]. Основываясь на опыте отечественных и иностранных специалистов, можно выделить основные этапы для реализации имитационной модели сложного перекрестка [5].

1. Описание местоположения перекрестка и примыкающей к нему улично-дорожной сети (УДС), изучение архитектуры исследуемого объекта (наличие железнодорожных путей, радиусы поворотов, длина и ширина проезжей части и т.д.). Определение состава (количество грузовых, легковых машин, автобусов, маршрутных такси и т.п.) и интенсивности существующих транспортных потоков по направлениям.

2. Определение количества и расположения светофоров, наличия различных светофорных фаз, в том числе выделения правых и (или) левых поворотов в отдельную разрешающую фазу.

3. Проведение статистического анализа распределений и интенсивностей существующих транспортных потоков по направлениям, суточных колебаний трафика, анализ проблемных направлений и выявление критических точек.

4. Выбор среды имитационного моделирования, определение характеристик транспортного потока, его состава и других свойств, необходимых для имитационной модели.

5. Разработка имитационной модели в выбранной среде.

6. Исследование поведения имитационной модели при существующем режиме работы светофора, проверка адекватности модели.

7. Выбор критериев и методов оптимизации, оптимизация режима программными средствами, анализ результатов.

Имитационное моделирование сложных перекрестков, состоящих из более чем двух пересечений и нескольких светофорных объектов, имеет особенности, которые следует учитывать при разработке модели. Важная задача управления транспортными потоками в этом случае – не столько выбор оптимальной продолжительности фаз, сколько обеспечение согласованной работы светофоров. Для выявления критических точек принципиально важно детальное и точное отображение геометрии перекрестка, поэтому для решения задачи первого этапа использовались Яндекс-карты, для имитационного моделирования и оптимизации – две различные среды: среда имитационного моделирования программирования Anylogic и оптимизатор OptQuest.

Для исследования системы согласованного управления выбран отдельный сложный перекресток городской транспортной системы г. Костаная с промежуточными стоп-линиями и с несколькими главными дорогами. Исследование заключалось в создании имитационной модели с учетом геометрии перекрестка, проведении экспериментов на модели для выявления влияния промежуточных стоп-линий и сложной геометрии на работу транспортного узла, выборе оптимальных параметров и режимов работы. Под параметрами подразумеваются геометрические характеристики перекрестка, интенсивность движения транспортных средств, количество

входных и выходных направлений на перекрестке, длительность разрешающих сигналов фаз, планировочные параметры перекрестка (т.е. расположение различных дорожных знаков: знак главной дороги, разрешающие знаки, запрещающие знаки, пешеходные переходы и расположение промежуточных стоп-линий т.д.).

Этапы построения модели

Этап 1. Исследование реально действующего объекта моделирования, изучение параметров проезжей части Костаная. Объектом моделирования служит пересечение просп. Абая, ул. Воинов-интернационалистов – ул. Баймагамбетова с большой разделительной зоной посередине. На подходе к перекрестку по просп. Абая с обеих сторон ул. Воинов-интернационалистов движение транспортных потоков осуществляется по двум полосам в каждом направлении, по ул. Баймагамбетова – по трем полосам в обоих направлениях, на примыкании со стороны училища по одной полосе в каждом направлении.

Интенсивность транспортных потоков по просп. Абая составляет в среднем

1317 привед. ед./ч, по ул. Воинов-интернационалистов – 570 привед. ед./ч в обоих направлениях, по ул. Баймагамбетова – 270 привед. ед./ч в обоих направлениях. Состав транспортного потока на пересечении представлен легковым и грузовым транспортом, автобусами; преобладает легковой транспорт (рис. 1).

В настоящее время движение транспортных потоков регулируется светофорами.

Отметим планировочную составляющую сложного перекрестка, т.е. расположение основных дорожных знаков (рис. 2).

Перекресток (рис. 2) состоит из трех основных направлений (ул. Воинов-интернационалистов, ул. Баймагамбетова, просп. Абая); эти направления указаны знаком «Главная дорога», на перекрестке есть еще два второстепенных направления, выходящих на ул. Быковского и во двор общеобразовательного учреждения. Кроме этого, на исследуемом объекте имеются две промежуточные стоп-линии, пешеходные переходы, присутствуют знаки «Въезд запрещён», т.к. на перекресток входят второстепенные направления, знаки



Рис. 1. Карта местности для имитационного исследования по г. Костаная (Яндекс-карты)

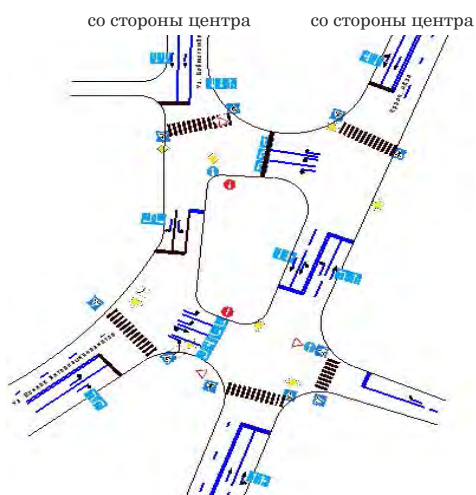


Рис. 2. Топографическое расположение основных дорожных знаков

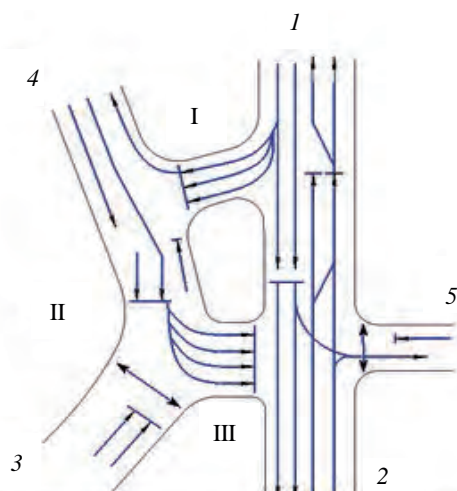


Рис. 3. Первая фаза

«Уступи дорогу». Есть разметка, указывающая направление движения автотранспорта.

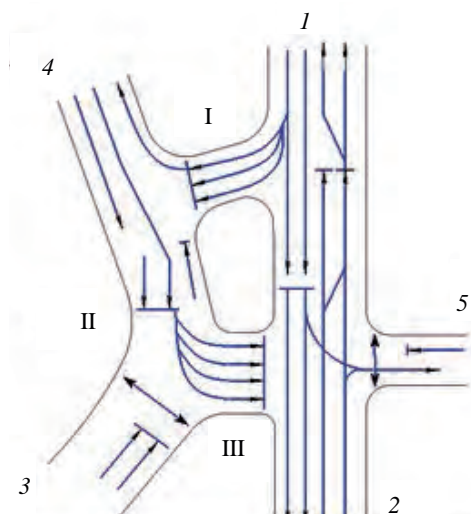
Этап 2. Анализ работы светофорного объекта.

Для регулирования представлена трехфазная система управления движением (СОД), исключая недопустимые конфликты «транспорт – транспорт». Результаты анализа конфликт-

ных направлений, проведенные для определения пофазного разъезда, приведены на схеме организации дорожного движения (рис. 3, 4).

Длительность фаз определяется интенсивностью транспортных потоков и временем, необходимым пешеходам для пересечения проезжей части со скоростью 1,3 км/ч. Длительность промежуточного такта светофорного цикла

а)



б)

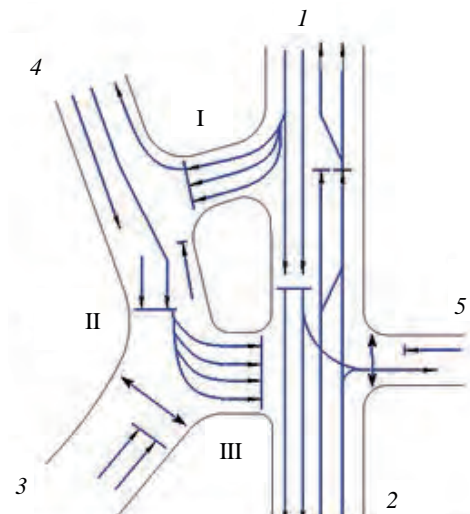


Рис. 4. Вторая фаза (а) и третья фаза (б)

обеспечивает полное и безопасное освобождение перекрестка после окончания основных тактов.

Первая фаза разрешает движение по направлению 1–2, 2–5, 4 – стоп-линия I, направление 5 – стоп-линия III, стоп-линия II.

Этап 3. Исследование интенсивности транспортного движения по направлениям (таблица 1).

Таблица 1

| Интенсивность транспортного движения | | |
|--------------------------------------|---|-------------------------|
| Номер геометрического направления | Интенсивность транспорта на полосу в приведенные ед./ч, пешеходов, чел./ч | |
| | фактическая, λ_i | допустимая, Λ_i |
| 1 | 500 | 900 |
| 2 | 430 | 900 |
| 3 | 600 | 700 |
| 4 | 200 | 700 |
| 5 | 120 | 700 |

Этап 4. Выбор среды проектирования имитационной модели.

Самая подходящая для реализации исследуемой модели – специализированная среда AnyLogic (мультимедийная имитационная среда, используется агентно-ориентированный метод, упрощающий разработку).

В имитационной модели определяются характеристики транспортного потока, его состав и наличие пешеходов. Программная среда AnyLogic позволяет выбирать нужные параметры движения автотранспорта (длина – 4 м, предпочитаемая скорость – 60 км/ч, максимальное ускорение – 1,8 м/с², максимальное возможное торможение – 4,2 м/с²). Транспортный поток представлен легковыми автомобилями, пешеходы на первом этапе исследования не учитываются.

Этап 5. Создание имитационной модели в среде AnyLogic происходит по следующему алгоритму: создание дорожной сети на соответствующем спутниковом снимке транспортного узла,

подключение карты пробок, разработка интерфейса управления имитационной моделью (включает матрицу распределения вероятности поворота автотранспорта, окна управления интенсивностями автотранспорта, датчики прибытия и убытия транспортных средств с возможностью подсчета последних и отображение результата прибытия и убытия по направлениям) (рис. 5, 6), задание интенсивности транспортных потоков (эквивалентной экспоненциально распределенному времени между прибытиями со средним значением, равным 1 (интенсивность прибытия)), создание и настройка светофорных фаз, оптимизация длительности светофорных фаз (с помощью оптимизатора OptQuest).

Этап 6. Проведение экспериментов на соответствие имитационной модели действительности, т.е. реальному светофорному объекту. Проверка работы имитационной модели в реальном и ускоренном времени показала совпадение средних выходных параметров с реальными на 85–90 % при прогонке при существующих параметрах движения.

Этап 7. Проведение оптимизационных экспериментов для реализации набора команд управления светофорным объектом (если необходимо) либо выбор наилучшего показателя длительности фаз, например, для некоторого востребованного направления, и последующее его применение.

Реализация имитационной модели в программе AnyLogic

Для работы в программе нужно задать интенсивности λ_i , $i = 1, \dots, 5$, транспортных средств по каждому из пяти направлений (поз. 5 – окна ввода, рис. 5, а), матрицу распределения вероятностей поворота

$$P = \{p_{ij}\}, i = 1, \dots, 5, j = 1, \dots, 5,$$

транспортного средства с одного из пяти направлений на одно из пяти других

а)

| | | Н Н в час | | | | | |
|---|---|--------------|-----|-----|-----|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 5 | 1 | 500 | 0,0 | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 0,1 |
| 4 | 2 | 430 | 0,3 | 0,0 | 0,5 | 0,1 | 0,1 |
| 3 | 3 | 600 | 0,3 | 0,4 | 0,0 | 0,25 | 0,05 |
| 4 | 4 | 200 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | 0,0 | 0,4 |
| 5 | 5 | 120 | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,0 |



в)

| | |
|---|------|
| 1 | 27,0 |
| 2 | 35,0 |
| 3 | 40,0 |

Рис. 5. Интерфейс управления имитационной моделью



Рис. 6. Интерфейс управления имитационной моделью

направлений, разворот и движение в обратную сторону по одному и тому же направлению исключается, т.к. такое движение запрещено (поз. 2, рис. 5), длительности разрешающих сигналов фаз u_k , $k = 1, 2, 3$ (поз. 6 – окна ввода, рис. 5).

Позиция 1 (рис. 5) – область визуализации имитационной модели движения транспортных средств на сложном перекрестке; транспорт поворачивает, тормозит на светофорах, ожидает (стоит) при возникновении затора.

В программе предусмотрены датчики, показывающие сколько транспортных средств покинуло область имитационного эксперимента, сколько движется от одного направления к другому (рис. 6, поз. 7), номер каждого направления (точка входа и выхода автотранспортных средств 9). Например, легковое транспортное средство появилось на направлении 3 (точка входа) и осуществило движение к точке выхода 1; рис. 6 показывает: на момент моделирования по данному маршруту проехало всего 25 транспортных средств. Предусмотрена также кнопка активации

карты пробок, которая подсвечивает красным цветом области проезжей части, где присутствует большое количество транспортных средств, т.е. образовалась пробка, зеленым – области, где транспортных средств нет либо их количество не критично, желтым – области, где количество автомашин еще не критично, но уже создает проблемы при организации движения (рис. 6, поз. 8).

Результаты эксперимента на основе действующего светофорного регулирования с известными интенсивностями λ_i представлены в таблице 1. В имитационной модели на этом этапе моделирования имеются некоторые упрощения: во-первых, рассмотрен только локальный перекресток, но не взаимодействие перекрестка с другими путями движения автотранспорта, то есть не учитывается возможность применения «зеленой волны», во-вторых, транспортный поток однообразный, состоит из только легковых автомобилей. Имитационная модель работает в течение 3600 с, т.е. в течение одного часа реального времени. Результат



Рис. 7. Результат имитационного моделирования при реальных параметрах

моделирования представлен на рис. 7, где через 1403 с имитационного моделирования возник затор.

Такая ситуация действительно не редкость на исследуемом перекрестке из-за множества конфликтных потоков и сложной геометрии пересечения.

Выбор оптимального режима работы СОД на основе имитационной модели

Оптимизация режимов светофора (оптимизация основных длительностей разрешающих сигналов фаз) – это рациональное использование разрешающих сигналов светофора для движения транспортных и пешеходных потоков, которое обеспечивает наименьшее время ожидания и уровень загрузки проезжей части дороги.

Классические методы расчета оптимального режима [1, 7, 8] – методы пошагового спуска, подъема, сдвига [12] – работают только для перекрестков, где нет промежуточных стоп-линий. Для согласования фаз на сложных перекрестках используются расчеты с по-

мощью специального программного обеспечения, например, с использованием имитационной модели. При проектировании имитационной модели загружается схема пофазного разбеда, программа анализирует конфликтные точки, интенсивности, вероятности поворотов на другие направления и находит (при заданной продолжительности разрешающих фаз) согласованный режим работы системы светофоров.

На рассматриваемом сложном перекрестке четыре мини-перекрестка, очень близких друг к другу (рис. 8). Координация проводится с помощью фаз и/или сложных промежуточных тактов на одном контроллере, а не с помощью сдвига, как можно было бы сделать для четырех отдельных перекрестков.

В рамках исследуемого объекта для поиска лучших длительностей разрешающих сигналов фаз применяется оптимизатор OptQues – одно из лучших программных решений для поиска оптимальных результатов; в нем применяются методы и алгоритмы нейронных сетей, генетического программи-

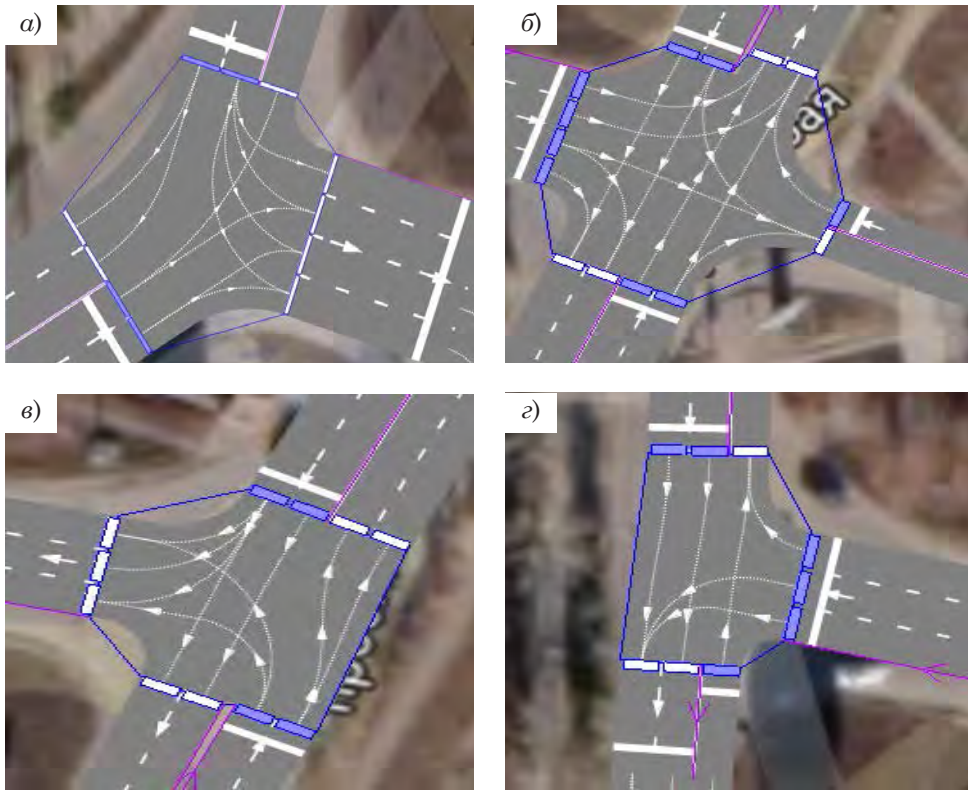


Рис. 8. Мини-перекрестки, входящие в составе исследуемого объекта
 а – просп. Абая – ул. Баймагамбетова; б – просп. Абая – ул. Быковского – ул. Воинов-интернационалистов; в – ул. Воинов-интернационалистов – ул. Баймагамбетова – ул. Быковского; г – ул. Баймагамбетова – просп. Абая – Воинов-интернационалистов

рования и классических методов оптимизации [4].

Организация поиска оптимальной длительности разрешающих фаз u_1, u_2, u_3 представляет собой итеративный процесс. Отметим, что длительности разрешающих фаз выбираются с учетом ограничений:

$$T_1 \leq u_k \leq T_2, k = 1, 2, 3.$$

Для расчетов выбирались следующие значения: $T_1 = 10$ с, $T_2 = 180$ с. Во время оптимизации программа выбирает оптимальные значения u_1^*, u_2^*, u_3^* в рамках эксперимента. В качестве критерия F выбрано среднее время прохождения перекрестка с учетом транспорта всех направлений. Входными

параметрами служат интенсивность автомобилей по направлениям, вероятности поворота транспортного средства на другое направление. Программа совершает «прогон» возможных значений длительностей u_1, u_2, u_3 на имитационной модели и вычисляет оптимальное (минимальное) значение целевой функции $F(u_1^*, u_2^*, u_3^*, \lambda_i, P)$. Отметим, что модель имитационная; по заданным интенсивностям $\lambda_i, i = 1, \dots, 5$, и вероятностям поворотов $P = \{p_{ij}\}, i = 1, \dots, 5, j = 1, \dots, 5$, с помощью датчиков случайных чисел моделируется случайный поток машин, поэтому для корректной оценки средних показателей следует запускать процесс моделирования при каждом значении управляющих воздействий на относительно

продолжительный интервал системного времени (например, один час). Затем производится анализ полученных результатов (таблица 2).

Таблица 2
Оптимальные значения
длительности разрешающих
сигналов при средних значениях
интенсивностей

| Параметр | Текущее | Оптимальное, u_i^* |
|---------------|---------|----------------------|
| Фаза 1, u_1 | 20 | 20 |
| Фаза 2, u_2 | 46 | 21 |
| Фаза 3, u_3 | 60 | 35 |

Для выбора оптимальной продолжительности разрешающих сигналов с использованием имитационной модели следует еще изучить устойчивость полученных оптимальных значений и всей системы к возможным колебаниям интенсивностей входящих потоков, так как значения разрешающих фаз, оптимальные при средних значениях интенсивностей, могут существенно увеличить среднее время прохождения перекрестка при пиковой загрузке системы за счет возникающих заторов. Таким образом, при выборе оптимального режима работы используем два критерия: минимум среднего времени прохождения сложного перекрестка при средних значениях интенсивности и ограничение на вероятность появления затора P_0 при пиковой загрузке системы (средние и допустимые значения интенсивностей для рассматриваемой приведены в таблице 1).

Литература

1. Алиев А. С., Стрельников А. И., Швецов В. И., Шершевский Ю. З. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к московской агломерации // Автоматика и телемеханика. 2005. № 11. С. 113–125. ISSN 0005-2310.
2. Бобрик П. П. Сравнение эффективностей треугольной и квадратной регулярных транспортных сетей // Транспорт: наука, техника, управление. 2005. С. 26. ISSN 0236-191.
3. Буслаев А. П., Новиков А. В., Приходько В. М. Вероятностные и имитационные оптимизации автодорожного движения. // Мир. 2003. 368 с. ISBN 5-03-003646-6.
4. Быков Е. А., Аксенов К. А., Антонова А. С. Аналитический обзор средств и методов для планирования имитационного эксперимента и синтеза мультиагентных процессов

$$F(u_1^*, u_2^*, u_3^*, \lambda_i, P) \rightarrow \min,$$

$$P_0(u_1^*, u_2^*, u_3^*, \lambda_i, P) \leq 0,05.$$

Решение полученной задачи оптимизации при наличии ограничений требует очень объемных имитационных экспериментов с различными значениями интенсивности, вероятностями поворота автомашин на другие направления, скоростями движения. Также важным фактором является разработка специальной программы оптимизации, состоящей из одного базового или композиции базовых алгоритмов.

Композиция не может учитывать все описанные данные, а относится только к их значимой части. Контрольная проверка полученной композиции должна осуществляться на последующих экспериментах. Задача считается успешно решенной, если контроль подтверждает результаты.

Выводы

Предложена методика анализа и выбора оптимальных параметров управления для сложного перекрестка с использованием имитационной модели и специальных программ оптимизации и имитационного моделирования. Показано, что используемых ресурсов недостаточно для получения оптимального режима для средних интенсивностей в пиковые часы. Выяснено, что перспективно использование адаптивных моделей регулирования, в том числе «умных светофоров», которые подстраиваются под изменение интенсивностей движения. ■

- преобразования ресурсов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. 9 с. ISSN 2070-7428.
5. Гасников А. В., Кленов С. Л., Нурминский Е. А. Введение в математическое моделирование транспортных потоков // Московский центр непрерывного математического образования. 2013. ISBN 978-5-4439-0040-7.
 6. Завалищин Д. С., Тимофеева, Г. А., Ахмадинуров М. М. Математические модели управления транспортными потоками : монография. – Екатеринбург : УрГУПС. 2011. 120 с. ISBN 978-5-94614-190-1.
 7. Клинковштейн Г. И., Афанасьев М. Б. Организация дорожного движения // Транспорт. 2001. 247 с. ISBN 5-277-02240-6.
 8. Кременец Ю. А., Печерский М. П. Афанасьев М. Б. – Технические средства организации дорожного движения // Академкнига. 2005. 279 с. ISBN 5-94628-11-9.
 9. Кузюрин Н. Н., Фомин С. А. Эффективные алгоритмы и сложность вычислений // Авторское электронное издание. 2007. ISBN 5-7417-0198-1.
 10. Минаков И.А. Сравнительный анализ некоторых методов случайного поиска и оптимизации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 1999. № 2. С. 286–293. ISSN 2658-4816.
 11. Смирнов Н. Н., Киселев А. Б., Никитин В. Ф. Математическое моделирование движения автотранспортных потоков методами механики сплошной среды // Труды Московского физико-технического института 2010. Т. 2. № 4 (8). С. 141 –151. ISSN 2072-6759.
 12. Стенбринк П. А. Оптимизация транспортных сетей // Транспорт. 1981. 320 с.
 13. Тарасян В. С., Куликова И. В., Мезенцев И. С. Построение системы нечеткого управления в мехатронных системах при помощи генетических алгоритмов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. 8 с. ISSN 2070-7428.
 14. Трапезникова М. А., Фурманова И. Р., Чурбанова Н. Г., Моделирование многополосного движения автотранспорта на основе теории клеточных автоматов // Математическое моделирование 2011. Т. 23. № 6. С. 133–146. ISSN 0234-0879.
 15. Швецов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С. 3–46. ISSN 0005-2310.

Literature

1. Aliev A. S., Strelnikov A. I., Shvetsov V. I., Shershevsky Yu. Z. Modelling of transport in a big city with application to Moscow conglomeration // Automatics and automatic remote control. [Modelirovanie transportnykh potokov v krupnom gorode s primeneniem k moskovskoj aglomeratsii // Avtomatika i telemekhanika] 2005. № 11. P. 113–125. ISSN 0005-2310.
2. Bobrik P. P. Comparison of efficiency of triangular and square regular transport networks // Transport: science, engineering, management. [Sravnenie effektivnostej treugol'noj i kvadratnoj reguljarnykh transportnykh setej // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie] 2005. P. 26. ISSN 0236-191.
3. Buslayev A. P., Novikov A. V., Prokhodko V. M. Probabilistic and simulational optimizations of motor vehicle // Mir. [Veroyatnostnye i imitatsionnye optimizatsii avtodorozhnogo dvizheniya // Mir.] 2003. 368 p. ISBN 5-03-003646-6.
4. Bykov E. A., Aksenov K. A., Antonova A. S. Analytical overview of means and methods for planning of a simulational experiment and synthesis of multi agent processes of transformation of resources // Modern problems of science and education. [Analiticheskij obzor sredstv i metodov dlya planirovaniya imitatsionnogo eksperimenta i sinteza mul'tiagentnykh protsessov preobrazovaniya resursov // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya] 2014. № 2. 9 p. ISSN 2070-7428.
5. Gasnikov A. V., Klenov S. L., Nurminsky E. A. Introduction to mathematical modeling of transport // Moscow centre of continuing mathematical education. [Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov // Moskovskij tsentr nepreryvnogo matematicheskogo obrazovaniya] 2013. ISBN 978-5-4439-0040-7.
6. Zavalishchin D. S., Timofeyeva G. A., Akhmadinurov M.M. Mathematical models of control: [Matematicheskie modeli upravleniya transportnymi potokami : // Izdatel'stvo UrGUPS.] monograph // USURT publishers. 2011. 120 p. ISBN 978-5-94614-190-1.

7. Klinkovstein G. I., Afanasiev M. B. Organization of road traffic // Transport. [Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya // Transport.] 2001. 247 p. ISBN 5-277-02240-6.
8. Kremenets Yu. A., Pechersky M. P., Afanasiev M. B. – Technical means of organization of road traffic // Academkniga. [Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya // Akademkniga.] 2005. 279 p. ISBN 5-94628-11-9.
9. Kuzyurin N. N., Fomin S. A. Effective algorithms and complexity of calculations // Author's electronic issue. [Effektivnye algoritmy i slozhnost' vychislenij // Avtorskoe elektronnoe izdanie.] 2007. ISBN 5-7417-0198-1.
10. Minakov I. A. Comparative analysis of some methods of sporadic search and optimization // Bulletin of Samara center of Russia's academy of sciences. [Sravnitel'nyj analiz nekotorykh metodov sluchajnogo poiska i optimizatsii // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk.] 1999. № 2. P. 286–293. ISSN 2658-4816.
11. Smirnov N. N., Kiselev A. B., Nikitin V. F. Mathematical modeling of motor transport using the methods of continuum mechanics // Papers of The Moscow physics and technology Institute 2010. [Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya avtotransportnykh potokov metodami mekhaniki sploshnoj sredy // Trudy Moskovskogo instituta] V. 2. № 4 (8). P. 141–151. ISSN 2072-6759.
12. Stenbrink P. A. Optimization of transport networks // Transport. [Optimizatsiya transportnykh setej // Transport.] 1981. 320 p.
13. Tarasyan V. S., Kulikova I. V., Mezentsev I. S. Construction of fuzzy control system in mechatronic systems with the help of genetic algorithms // Modern problems of science and education. [Postroenie sistemy nechetkogo upravleniya v mekhatronnykh sistemakh pri pomoshhi geneticheskikh algoritmov // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.] 2014. № 6. 8 p. ISSN 2070-7428.
14. Trapeznikova M. A., Furmanova I. P., Churbanova N. G. Modelling of motor transport multilane on the basis of cellular automata theory // Mathematical modeling [Modelirovanie mnogopolosnogo dvizheniya avtotransporta na osnove teorii kletochnykh avtomatov // Matematicheskoe modelirovaniya] 2011. V. 23. № 6. P. 133–146. ISSN 0234-0879.
15. Shvetsov V. I. Mathematical modeling of transport // Automatics and automatic remote control. [Matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov // Avtomatika i telemekhanika.] 2003. № 11. P. 3–46. ISSN 0005-2310.

Статья сдана в редакцию 25 октября 2019 года