

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-401-412>

УДК 656

Управление в интеллектуальной транспортной системе г. Минска

Докт. техн. наук Д. В. Капский¹⁾, Д. В. Навой¹⁾, докт. техн. наук П. А. Пегин²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье рассмотрены алгоритмы поиска максимального объема движения дорожных транспортных средств в светофорном цикле при распределенном импульсе интенсивности и оптимизации сдвигов при координированном регулировании движения транспортных потоков. Выполнено моделирование транспортных потоков с использованием разработанной авторами компьютерной программы, что позволило повысить эффективность управления дорожным движением за счет учета распределенного импульса интенсивности транспорта. Предложена модель для минимизации суммарных потерь в дорожном движении при интеграции подсистемы контроля инцидентов и маршрутного ориентирования и автоматизированной системы управления дорожным движением в составе интеллектуальной транспортной системы г. Минска, которая исследована в качестве инструмента для моделирования системы автоматизированного проектирования «Магистральное управление». Модель, минимизирующая задержки автомобилей, использует алгоритм реализации по параметрам интенсивностей транспортных потоков в зависимости от времени суток, дней недели. В результате моделирования выявлено, что наиболее эффективным параметром является показатель задержек автомобилей, который не всегда удовлетворяет водителей, стремящихся выбирать маршруты своего движения исходя из минимальной скорости сообщения. Однако, с точки зрения управления интеллектуальной транспортной системой, необходимо выбирать параметры с учетом требований минимизации задержек на улично-дорожной сети крупнейшего города нашей страны. Предложенные алгоритмы и модели применяются в автоматизированной системе управления дорожным движением города Минска и будут использованы при создании целостной интеллектуальной транспортной системы города.

Ключевые слова: дорожное движение, управление движением, алгоритмы управления, автоматизированная система управления дорожным движением, интеллектуальная транспортная система, эффективность, качество, координированное регулирование

Для цитирования: Капский, Д. В. Управление в интеллектуальной транспортной системе г. Минска / Д. В. Капский, Д. В. Навой, П. А. Пегин // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 5. С. 401–412. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-401-412>

Control of Intelligent Transport System in Minsk

D. V. Kapskiy¹⁾, D. V. Navoy¹⁾, P. A. Pegin²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. The paper considers algorithms for searching a maximum traffic volume of road vehicles in a traffic light cycle with a distributed intensity pulse and optimization of shifts under coordinated traffic flow control. Modeling of traffic flows have been made while using a computer program developed by the authors and it has made it possible to improve efficiency of traffic management by taking into account the distributed pulse of transport intensity. The paper proposes a model for minimizing total losses in road traffic during the integration of an incident control sub-system and route guidance for

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-70
oapdd_atf@bntu.by

Address for correspondence

Kapskiy Denis V.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-70
oapdd_atf@bntu.by

and an automatic road traffic management system as part of Minsk intelligent transportation system which has been studied as a tool for modeling a computer-aided design system "Backbone management". The model that minimizes vehicle delays, uses an algorithm implementing traffic flow intensity parameters depending on the time of day, days of the week. As a result of the simulation it has been revealed that the most effective parameter is an indicator of vehicle delays which does not always satisfy drivers trying to choose routes of their traffic which are based on a minimum transportation speed. However, from the point of view of managing an intelligent transportation system, it is necessary to choose parameters based on the requirements for minimizing delays on the road traffic network of the largest city in our country. All the proposed algorithms and models are used in the automatic traffic management system of Minsk city and will be used while creating an integrated intellectual transportation system of the city.

Keywords: road traffic, traffic management, management algorithms, automatic traffic management system, intelligent transportation systems, efficiency, quality, coordinated regulation

For citation: Kapskiy D. V., Navoy D. V., Pegin P. A. (2018) Control of Intelligent Transport System in Minsk. *Science and Technique*. 17 (5), 401–412. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-401-412>(in Russian)

Введение

Предоставление информации о рекомендуемом маршруте следования – инструмент влияния на поведение пользователей. Оптимизация маршрута может идти по различным параметрам (время сообщения по маршруту, задержки на улично-дорожной сети (УДС), оптимальное положение системы и оптимальные параметры для пользователя). Системы контроля инцидентов и маршрутного ориентирования могут быть использованы в повседневных условиях дорожного движения, а особенно при инциденте. В случае инцидента пользователи извлекают непосредственную выгоду от использования системы [1–3]. Существуют три способа получить информацию о предполагаемом маршруте, по которому поедет пользователь. Первый – перед поездкой доведение информации, например, посредством радио, телевидения или Интернета. Таким образом, пользователь получает информацию, ее обновление и планирует маршрут движения, в том числе с отказом от использования личного транспорта в пользу общественного. Второй способ – это информационные электронные табло (динамические информационные табло), отображающие информацию о маршруте в стратегически важных точках УДС [4–6]. Третий способ – рекомендации, которые доводятся до пользователей посредством бортовых систем навигации автомобилей или с помощью смартфонов. Помимо цели создания системы ориентирования, есть также различные типы стратегий. Итеративная стратегия осуществляет повторный процесс моделирования для достижения оптимальных целей (либо системы или оптимальных пользователей). Этот подход может быть введен в модель интеллектуального управления. Его трудно применять на практике для операций в реальном времени, так как требуется много вычис-

лений. Другой тип – группа одноразовых стратегий. В этой группе находятся реактивные подходы управления или (реже) прогнозные подходы (где модель используется для прогнозирования в ближайшем будущем) [1, 7].

Предлагаемое решение проблемы

Простейшее правило принятия решений – выбор кратчайшего пути [8]. В большинстве случаев расширение используемых маршрутов является более эффективным подходом, который может быть достигнут с помощью стохастических моделей, основанных на случайной полезной модели. Полиномиальная логит-модель [9] может использоваться для выбора альтернативного маршрута, если он независим. Этот метод учитывает, что маршрут менее выражен, если ссылки используются также в других маршрутах. Модель «с-логит» [9] делает подобную вещь с помощью коэффициента общности.

Существуют различные стратегии управления дорожным движением: на локальном, магистральном и сетевом уровнях. Для офлайн-управления сетью широко используется модель TRANSYT [10], когда заранее по статистическим данным разрабатываются планы координации. В режиме реального времени и с использованием адаптивного управления широко известны такие модели, как SCATS [11] и SCOOT [12], которые разработаны и апробированы в 70-е и 80-е гг. прошлого века. Другие аналогичные, но не часто используемые, системы: OPAC [13], французская PROLYN [14], итальянская UTOPIA [15], испытанная и используемая в некоторых городах Европы, RHODES [16]. SCATS и SCOOT применяются во всем мире, а другие системы реализуются только в некоторых городах и в основном для тестирования. Расширенный обзор локальных и сетевых стратегий управления представлен

в [17], где также предложена новая стратегия управления на основе мультиагентного подхода. Рассмотрим проблему интеграции системы управления дорожным движением и системы маршрутного ориентирования и навигации.

Одной из интересных концепций взаимодействия системы управления дорожным движением и системы маршрутного ориентирования и навигации является концепция «обратного давления» (также известная как «максимальное давление», «максимальный вес», «максимальная производительность», «максимальный перепад отставания») [18]. Полагая, что пользователи направляются из пункта отправления в пункт назначения посредством радиосети, предполагается, что в любом узле сети, представленной в виде ориентированного графа, клиенты могут войти на сервер и получить маршрут движения. Существует проблема контроля оптимальной пропускной способности, и кроме того, состояние сети должно быть стабильным. Контроль «обратного давления», как правило, состоит из набора контроллеров, каждый из которых относится к узлу в сети. Перекресток может управляться контроллером «обратного давления», который оптимизирует свою работу по минимизации параметров дорожного движения в соответствии с заданными алгоритмами. Это подчеркивает децентрализованный подход к управлению. Типичный алгоритм «обратного давления» представляет собой разницу между транспортной нагрузкой, идущей к перекрестку и выходящей с перекрестка. Другой подход предлагается в [19, 20], где рассматривается только транспортный поток, ведущий к перекрестку.

Алгоритм «обратного давления» обеспечивает максимальную пропускную способность каждого узла и сети в целом при интеграции системы управления дорожным движением и системы маршрутного ориентирования и навигации. И хотя алгоритм «обратного давления» применяется для управления работой светофоров [21–23], однако он практически не использовался для системы контроля инцидентов и маршрутного ориентирования.

Создание модели второго уровня управления

Предлагаемая модель второго уровня основана на реализации двух алгоритмов: поиска максимального объема движения в цикле при распределенном импульсе интенсивности и оп-

тимизации сдвигов при координированном регулировании.

Новизна алгоритма поиска максимального объема движения в цикле при распределенном импульсе интенсивности заключается в использовании для расчетов продолжительности цикла и разрешающего сигнала такого параметра, как импульс интенсивности, распределенный в цикле регулирования. А «плавающая» точка дает представление о сдвиге начала включения разрешающего сигнала не только в структуре цикла, но и по отношению к соседним регулируемым перекресткам, что позволяет моделировать приход «пачки» к ним и минимизацию потерь на магистрали. Импульс интенсивности видоизменяется на протяжении всей магистрали. На перегоне величина зеленого сигнала перекрестка, с которого стартовал поток, уже вторична, и необходимо рассматривать две такие величины, как ширина ленты времени для координированного регулирования и продолжительность разрешающего сигнала для перекрестка, к которому прибывает транспортный поток. Физически детектирование импульса интенсивности в каждом сечении возможно с использованием радар-детекторов, спутникового мониторинга. Возможно применение модели с установкой Bluetooth-детекторов.

Описываемый алгоритм предлагается использовать в автоматизированной системе управления дорожным движением (АСУДД) при координированном регулировании третьего поколения (управление в реальном масштабе времени). Функциями алгоритма оптимизации сдвигов являются анализ оптимальности сдвигов и модификация базового плана координации. Исходными данными служат: номер исходного (базового) плана координации; импульсы интенсивности по перегонам магистрали; номер дорожного контролера (ДК); время включения оптимизируемой фазы на этом ДК и номер ДК, относительно которого оптимизируется время включения фазы (входной ДК).

При работе в АСУДД алгоритм оптимизации сдвигов запускается непосредственно с автоматического рабочего места диспетчера. Оптимизации подвергается текущий план координации по объему потерь. Реализация алгоритма возможна только при наличии на периферийном уровне детекторов транспорта. Наибольшая эффективность достигается при установке детекторов транспорта в ключевых точках улично-дорожной сети с учетом транспортно-пешеходной нагрузки.

Реализация алгоритма оптимизации сдвигов при его применении на реальных объектах г. Минска (улицах Карбышева, Калиновского, Волгоградской) при изменении транспортной нагрузки по времени суток, дням недели, временам года позволила снизить величину потерь от задержек и остановок транспорта в среднем на 18 %. По результатам исследования рекомендовано использовать алгоритм оптимизации сдвигов в период опытной эксплуатации и при смене времен года для разработки карт времени и оптимизации планов координации в реальном масштабе времени с целью модификации базовых планов координированного управления.

Выделим события, влияющие на условия оптимизации:

- прогнозируемые события: статистически постоянно возникающие события (ежедневные параметры транспортных потоков при нормальных условиях и т. д.); не постоянно возникающие события (спортивные, культурно-массовые мероприятия и т. д.);

- внезапно возникающие события (инциденты): ДТП, затор, ремонтные работы, террористическая угроза на участке УДС, техногенное

происшествие на участке УДС, ухудшение погодных условий, помеха на проезжей части (пешеход, груз и т. д.), стихийное массовое мероприятие.

Каждый тип событий, влияющих на условия оптимизации, требует различных методов по мониторингу, идентификации, минимизации и устранению последствий (в случае возникновения инцидента).

В статье исследуются три различные структуры модели третьего уровня. Структура 1 трехуровневой модели, выбирающая маршрут на основе анализа коэффициентов загрузки полос, представлена на рис. 1.

Трехуровневая модель, выбирающая маршрут на основе анализа коэффициентов загрузки полос (структура 1), реализуется следующим образом: получение запроса от водителей о необходимости движения по маршруту $A-B$; расчет кратчайшего пути между точками A и B ; запрос на расчет времени сообщения по запрашиваемому маршруту; расчет времени циклов, задержек и коэффициентов загрузки полос для всех регулируемых перекрестков по маршруту $A-B$ (используя модель 1); проверка коэффициентов

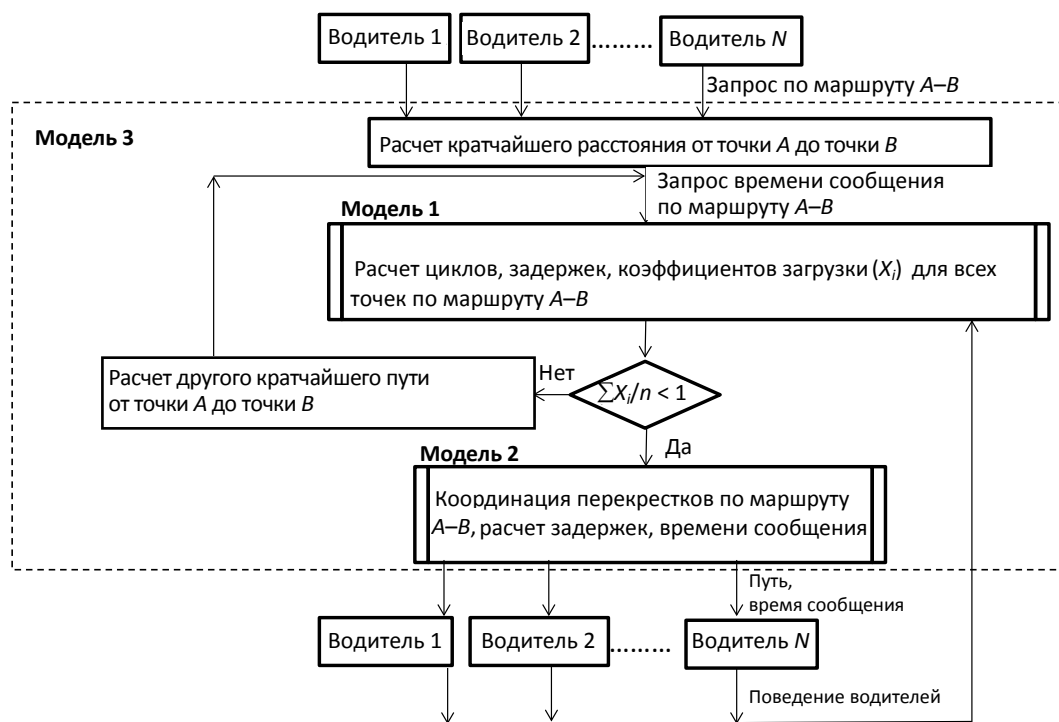


Рис. 1. Структура 1 трехуровневой модели, выбирающая маршрут на основе анализа коэффициентов загрузки полос

Fig. 1. Structure 1 of three-level model selecting route on the basis of analysis of load lane ratio

загрузки полос на условие $\sum X_i/n < 1$, где $\sum X_i$ – суммарный коэффициент загрузки полос для рассматриваемого направления, n – количество полос рассматриваемого направления; координата регулируемых пересечений по маршруту $A-B$, расчет задержек, времени сообщения (используя модель 1); доведение до пользователей информации о рекомендуемом маршруте движения из точки A в точку B и времени сообщения при движения по маршруту; отслеживание поведения водителей на предмет их возможного движения не по рекомендуемому маршруту.

Для отслеживания запросов от водителей (пользователей) о маршрутах движения предлагается использовать специализированное навигационное программное обеспечение. Данное программное обеспечение позволит водителям получать информацию о дорожно-транспортной ситуации на улично-дорожной сети в реальном масштабе времени. Так, водители смогут иметь информацию об интенсивности движения, о задержках вследствие различных инцидентов, а также о времени сообщения по запрашиваемому маршруту. Данные, предоставляемые водителям, рассчитываются с помощью моделей первого и второго уровней на основании данных с детекторов транспорта.

Для обеспечения обратной связи между системой управления дорожным движением и водителем (пользователем) в программном обеспечении должна быть предусмотрена функция «выбор маршрута». Подобная функция уже существует во многих навигационных программных продуктах, таких как Navitel, iGo и др. Однако данная информация не поступает в систему управления дорожным движением, и в этом коренное отличие существующей и предлагаемой функции программного обеспечения. При поступлении в систему управления движением информации о запрашиваемом пользователем маршруте система с помощью моделей первого, второго и третьего уровней доводит информацию до пользователя и отслеживает их реальное перемещение.

Одной из необходимых для решения является задача технического обеспечения для отслеживания маршрутов движения водителей (пользователей). В настоящее время такая возможность существует, однако повсеместно по-

ка не используется. В качестве решения данной задачи могут быть использованы: gsm-информации от операторов связи, gprs-данные, Глонасс-данные, Bluetooth-данные или специализированные RFID-метки. Техническое решение задачи лежит в плоскости выбора оператора системы управления дорожным движением. Предлагается в рамках реализации предложенной трехуровневой модели использовать gprs-данные от бортовых данных навигационных устройств или смартфонов пользователей.

Структура 2 трехуровневой модели, рассматривающей все возможные маршруты следования, представлена на рис. 2.

Трехуровневая модель для возможных маршрутов следования (вариант 2) реализуется следующим образом: получение запроса от водителей о необходимости движения по маршруту $A-B$; расчет расстояний для максимально возможного количества маршрутов из точки A в точку B ; запрос времени сообщения для максимально возможного количества маршрутов из точки A в точку B ; расчет времени цикла, задержек и коэффициентов загрузки полос для максимально возможного количества маршрутов из точки A в точку B (используем для расчетов модель 1); моделирование координации и расчет задержек и времени сообщения для максимально возможного количества маршрутов из точки A в точку B (используем для расчетов модель 2); выбор маршрута с минимальным значением показателя задержек; доведение до пользователей информации о рекомендуемом маршруте из точки A в точку B и времени сообщения при движении по маршруту; отслеживание поведения водителей на предмет их возможного движения не по рекомендуемому маршруту.

Структура 2 является идеальной для поиска оптимального маршрута, однако его полная реализация не представляется возможной. Поэтому предлагается ограничить количество рассматриваемых маршрутов с кратчайшим расстоянием от точки A до точки B до 3–6. Структура 3 модели для расчета 3–6 кратчайших маршрутов и выбора из них оптимального на условиях минимального значения задержек представлена на рис. 3. В статье рассматриваются результаты от сравнения трехуровневой модели для структур 1 и 3.

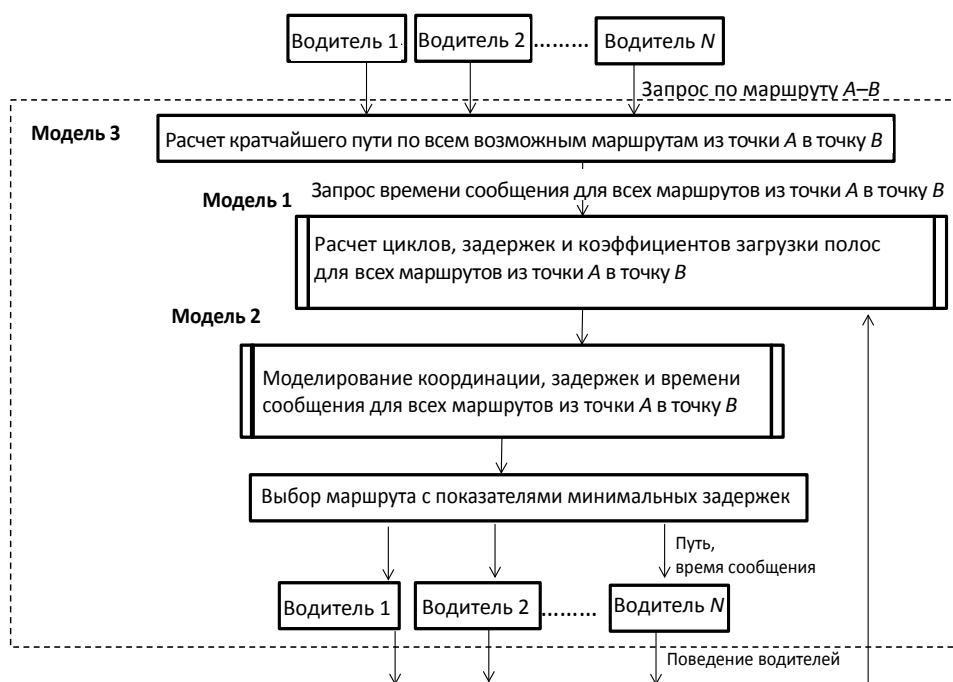


Рис. 2. Структура 2 трехуровневой модели, рассматривающей все возможные маршруты следования

Fig. 2. Structure 2 of three-level model considering all the possible routes

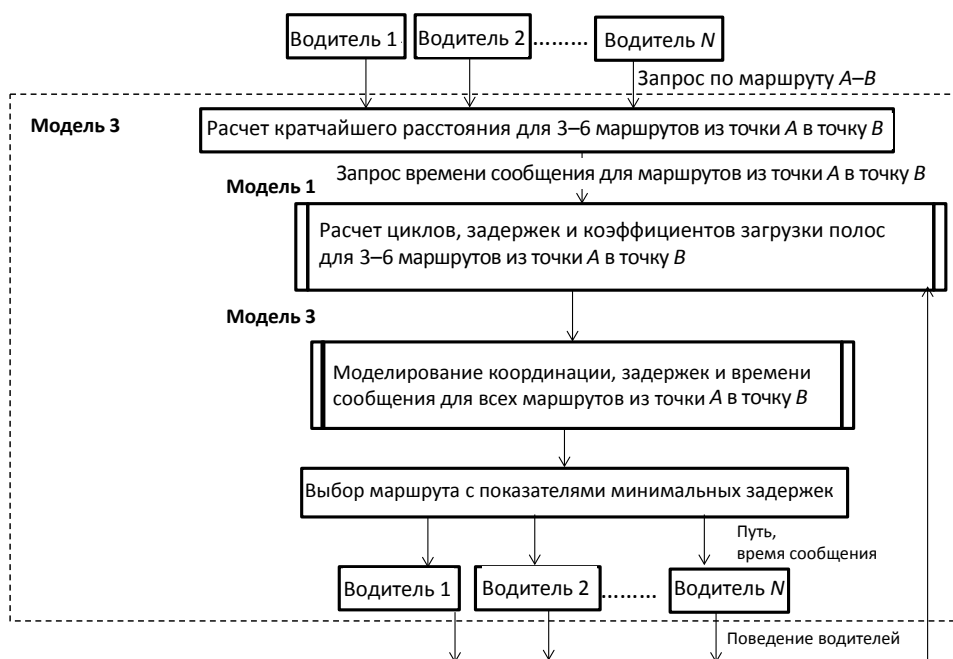


Рис. 3. Структура 3 трехуровневой модели для 3-6 кратчайших маршрутов

Fig. 3. Structure 3 of three-level model for 3-6 shortest routes

Экспериментальное исследование условий движения

Для проведения экспериментов воспользуемся САПР «Магистральное регулирование» и «Локальное регулирование» разработки ОАО «Агат». САПР позволяют моделировать

работу светофорных объектов на локальном и магистральном уровнях. Расчет сетевого уровня проводился с помощью САПР «Магистральное регулирование» путем наложения параметров магистралей. САПР позволяет рассчитывать задержки, коэффициенты загрузки

полос и время сообщения. Исследование проводилось на улично-дорожной сети г. Минска в микрорайоне Брилевичи (допущения: на улично-дорожной сети установлены динамические информационные табло (ДИТ), информирующие о текущей дорожно-транспортной ситуации; у водителей (пользователей) имеется специализированное программное обеспечение, позволяющее проинформировать систему управления дорожным движением в рамках реализации трехуровневой модели о маршрутах следования; в транспортных средствах есть бортовые устройства, позволяющие отслеживать их маршрут).

Сценарий, когда водителю (пользователю) необходимо попасть из точки P1 в точку P7, однако на участке P5–P6 произошло дорожно-транспортное происшествие, которое заблокировало планируемое движение водителя по маршруту P1–P2–P3–P5–P6–P7, представлен на рис. 4.

Длина маршрута P1–P2–P3–P5–P6–P7 – 2300 м. При нормальных условиях (без инцидента) время сообщения от точки P1 до точки P7 составляет 4 мин. Время сообщения от точки P1 до точки P7 по маршруту P1–P2–P3–P4–P7 – 5 мин, длина маршрута – 2400 м. Предположим, что ДИТ установлено за 200 м до перекрестков P3 и P8. При средней скорости движения 50 км/ч вероятность выполнения требований ДИТ составляет 60 % (рис. 5).

При возникновении ДТП на участке P5–P6 модель рассчитывает загрузку улично-дорож-

ной сети и время сообщения между точками P1 и P7. В случае, если время сообщения по маршруту P1–P2–P3–P5–P6–P7 больше времени сообщения по маршруту P1–P2–P3–P4–P7, информация об изменении рекомендуемого маршрута доводится до пользователей (водителей) с помощью ДИТ и специализированного программного обеспечения, установленного в смартфонах или бортовых навигационных устройствах автомобилей. На рис. 4 представлен выбор маршрута для сценария с ДТП с использованием кратчайшего пути (маршрут 1).

Модель 1 и модель 2 рассчитывают время цикла, задержки, время сообщения, коэффициент загрузки полос и синхронизируют (координируют) время включения разрешающего сигнала по маршруту P1–P2–P3–P4–P7. Если водители продолжают двигаться по маршруту P1–P2–P3–P5–P6–P7, количество транспортных средств в сегменте P5–P6 увеличивается, длина очереди превышает 300 м, светофорный объект в точке P3 начинает регулировать транспортный поток таким образом, чтобы не допустить движение транспорта в район сегмента P5–P6, как показано на рис. 6. Однако в направлении сегмента P5–P6 выделяется минимальное время фазы, при этом пользователи повсеместно с помощью вышеуказанных устройств информируются о ДТП в сегменте P5–P6.

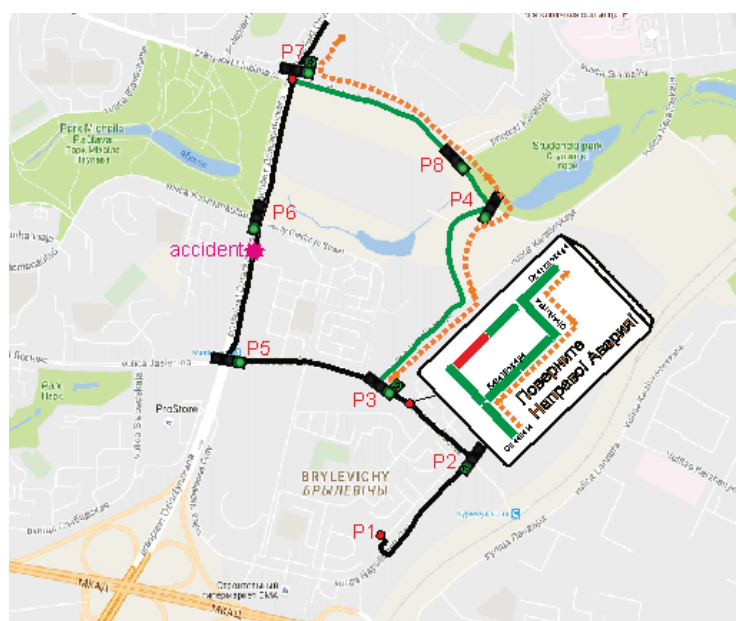


Рис. 4. Сценарий с дорожно-транспортным происшествием и использованием водителем кратчайшего пути (маршрут 1)

Fig. 4. Scenario with road traffic accident and usage of shortest route by driver (Route 1)

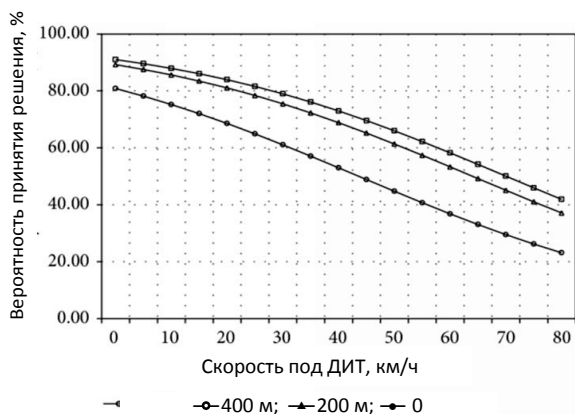


Рис. 5. Вероятность выполнения рекомендаций динамического информационного табло, основанная на логической регрессионной модели

Fig. 5. Probability in fulfillment of recommendations for dynamic information board which is based on logic regression model

В соответствии с алгоритмом трехуровневой модели для структуры 1 при перераспределении транспортных потоков по рекомендуемому маршруту интенсивность транспорта по маршруту P1–P2–P3–P4–P7 увеличится, что приведет к необходимости корректировки ра-

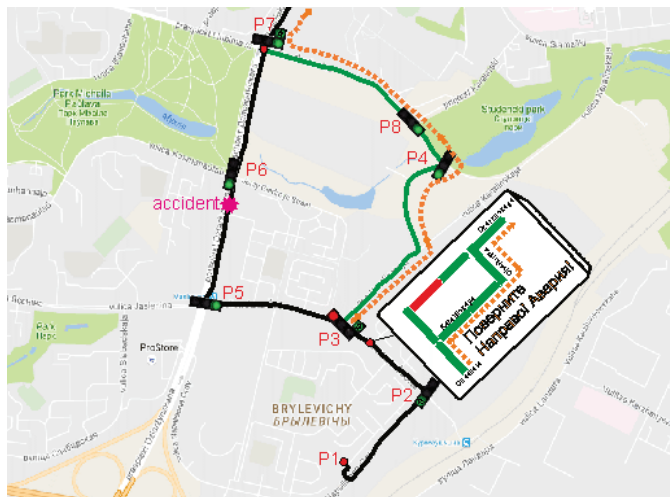


Рис. 6. Пример выбора маршрута для сценария с дорожно-транспортным происшествием при управлении в узле P3 (маршрут 1)

Fig. 6. Example of route selection for scenario with road traffic accident while driving at junction point P3 (Route 1)

боты светофоров по рассматриваемому маршруту. В случае, когда величина коэффициента загрузки полос достигнет единицы ($\sum X_i/n = 1$), модель (система) должна предоставить водителям другой маршрут. Пример предоставления альтернативного маршрута для структуры 1 трехуровневой модели представлен на рис. 7 (маршрут 2).

В случае, если коэффициенты загрузки полос $\sum X_i/n = 1$ и время сообщения по маршрутам P1–P2–P3–P5–P6–P7 и P1–P2–P3–P4–P7 превышает время сообщения, прогнозируемое системой по маршруту P1–P2–P3–P4–P8–P9–P10–P7, а именно 9 мин, система перенаправляет транспортный поток по маршруту P1–P2–P3–P4–P8–P9–P10–P7 и отображает на информационных табло, смартфонах, навигационных системах соответствующую информацию. При уменьшении X_i по маршруту P1–P2–P3–P4–P7 и появлении возможности проезда по нему за время, менее 9 мин, трехуровневая модель предложит пользователям этот маршрут. Операция повторяется постоянно, пока существует ДТП.

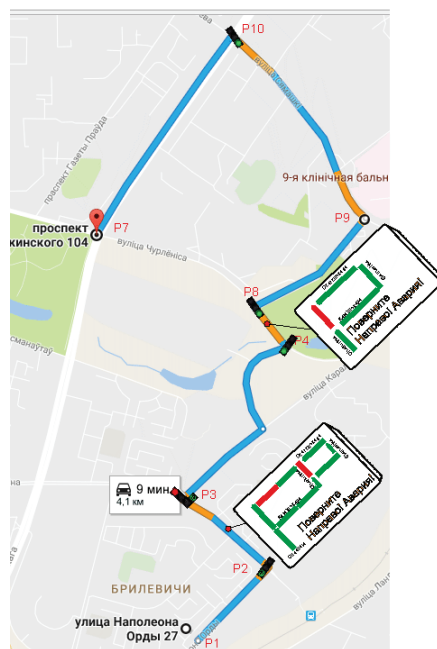


Рис. 7. Пример предоставления альтернативного маршрута для структуры 1 трехуровневой модели (маршрут 2)

Fig. 7. Example of alternative route provision for structure 1 of three-level model (Route 2)

Помимо данных от датчиков, находящихся на улично-дорожной сети, в трехуровневую модель также поступают данные от n количества пользователей, которые хотят из точки P1 попасть в точку P7. Модель анализирует текущую ситуацию с загрузкой улично-дорожной сети и сравнивает ее с количеством поступивших запросов в течение времени t . Причем время t рекомендуется принимать в пределах 15 мин, так как именно за этот период ситуация на улично-дорожной сети может измениться.

Допустим, модель получила информацию-запрос от n пользователей (водителей) на кратчайший путь из точки P1 в точку P7. При этом количество n такое, что $\sum X_i/n \geq 1$, где $\sum X_i$ – суммарная загрузка полосы по одному из направлений по маршруту P1–P7. Тогда трехуровневая модель показывает, что улично-дорожная сеть не загружена по определенным направлениям по маршруту P1–P7 только пользователями (водителями), которые отправили запрос до момента наступления при их движении условия $\sum X_i \geq 1$. Те же пользователи (водители), отправившие запрос после определения, что $\sum X_i \geq 1$, будут направлены системой по тому маршруту, в котором время сообщения минимально с учетом имеющихся параметров $\sum X_i$.

Для исследования эффективности работы структуры 3 трехуровневой модели предложен еще один альтернативный маршрут 3, показанный на рис. 8.



Рис. 8. Пример использования маршрута 3 для изучения структуры 3 трехуровневой модели

Fig. 8. Example of route usage for studying structure 3 of three-level model (Route 3)

Результаты эксперимента

При сравнении вариантов маршрутов для структур 1 и 3 трехуровневой модели проводилось исследование для двух структур трехуровневой модели (структуры 1 и 3) на трех вариантах маршрутов. Для каждого маршрута в САПР «Магистральное регулирование» интенсивность движения транспорта изменялась на 100 ед./ч для входного перекрестка в точке P2 и увеличивалась на 60 % на других перекрестках маршрутов. Результаты экспериментов представлены на рис. 9–11.

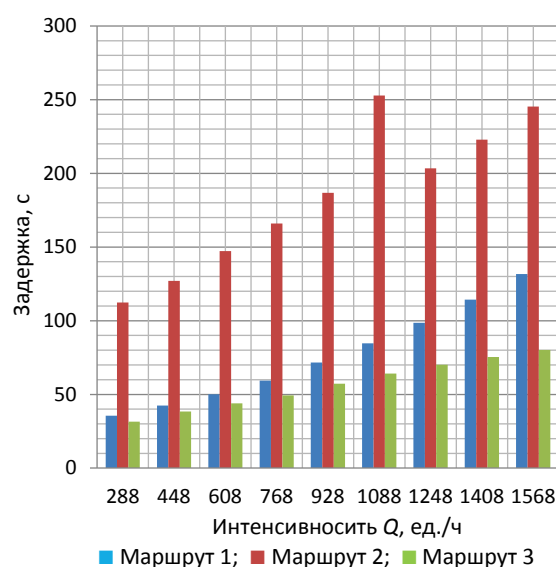


Рис. 9. Суммарные задержки по маршрутам в зависимости от интенсивности движения

Fig. 9. Total route delays according to road traffic intensity

Как видно из рис. 9, минимальные задержки достигаются при использовании водителями (пользователями) маршрута 3. Минимальное время сообщения достигается при использовании маршрута 1 (рис. 10).

Минимальное значение коэффициента загрузки полос достигается при использовании маршрута 3. Данные результаты показывают, что структура 1 трехуровневой модели дает худшие результаты по времени сообщения, однако лучшие по уровню задержек и коэффициентам загрузки полос. Структура 3 трехуровневой модели показывает наилучшие результаты по времени сообщения и худшие по сравнению со структурой 1 по уровню задержек и коэффи-

циентам загрузки полос. С точки зрения пользователей (водителей), им необходимо добраться из точки P1 в точку P7 за кратчайшее время, и структура модели 3 данную функцию реализовывает. Однако, с точки зрения системы управления дорожным движением, нужно учитывать уровень задержек на всей улично-дорожной сети и предлагать пользователям (водителям) оптимальный, с точки зрения задержек, маршрут. Возникает конфликт интересов между пользователем и системой управления дорожным движением.

Предлагается использовать структуру 1 трехуровневой модели, которая минимизирует задержки и коэффициент загрузки полос на исследуемых маршрутах. Результаты исследования

могли бы быть другими, если бы водители (пользователи) на 100 % доверяли информации, предоставляемой системой. Дальнейшие исследования должны быть направлены на интеграцию и координацию стратегий управления. Установка ДИТ и использование специализированного программного обеспечения требуют дополнительного изучения. Также целесообразно протестировать модель в реальных условиях и на более разветвленной сети с большим количеством возможных сценариев. Основной интерес вызывает поведение водителей в случае доведения до них информации о маршрутах, соответствующих минимальным параметрам задержек, но при этом имеющих неоптимальные параметры по времени сообщения.

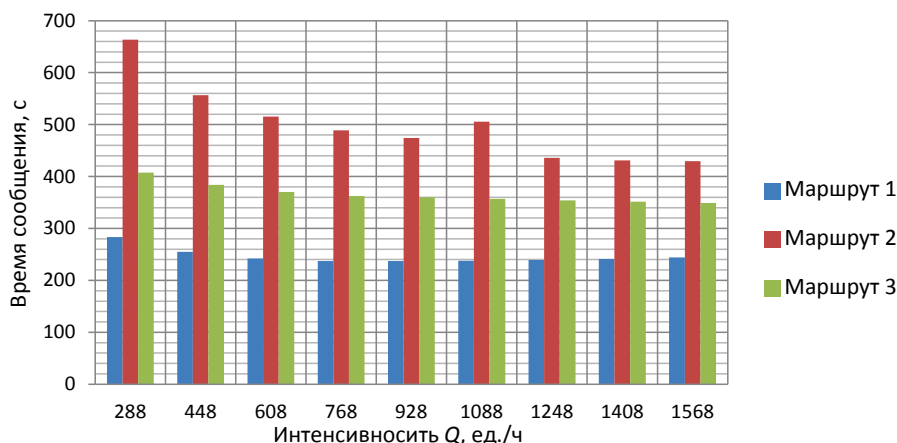


Рис. 10. Время сообщения по маршрутам в зависимости от интенсивности движения

Fig. 10. Route transportation time according to road traffic intensity

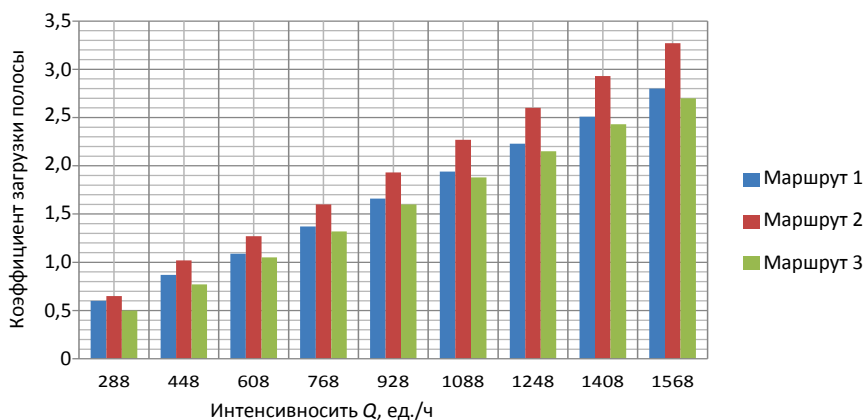


Рис. 11. Коэффициент загрузки полосы по маршрутам в зависимости от интенсивности движения

Fig. 11. Route load lane ratio according to road traffic intensity

ВЫВОДЫ

1. Предложена модель для минимизации потерь в дорожном движении при интеграции подсистемы контроля инцидентов и маршрутного ориентирования и автоматизированной системы управления дорожным движением в составе интеллектуальной транспортной системы Минска, которая исследована в качестве инструмента для моделирования САПР «Магистральное управление». Инновация первой ее составляющей состоит в том, что аналогичные «нечеткие» модели реализуются на основе алгоритма местного гибкого регулирования, в работе предложен алгоритм реализации по параметрам интенсивностей в зависимости от времени суток, дней недели. В результате моделирования выявлено, что наиболее эффективным параметром является показатель задержек. Но он не удовлетворяет водителей, которые стремятся выбирать маршруты с учетом минимальной скорости сообщения. Однако, с точки зрения управления интеллектуальной транспортной системой в целом, необходимо выбирать параметры исходя из требований минимизации задержек на улично-дорожной сети.

2. Алгоритм оптимизации сдвигов при координированном регулировании реализован в действующей автоматизированной системе управления дорожным движением Минска и при реализации в составе второй компоненты позволит увеличить эффективность управления на магистральной улично-дорожной сети на 10–15 %. Таким образом, наибольшую эффективность показала модель, основанная на минимизации задержек. С точки зрения интеллектуальной транспортной системы, данный параметр является одним из ключевых, однако по-прежнему остаются не изученными вопросы поведения водителей при доведении до них информации о маршрутах движения, приводящих к минимизации задержек, но не минимизирующих время движения по конкретно заданному водителем маршруту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Review of Road Traffic Control Strategies / M. Papageorgiou [et al.]. Proceedings of the IEEE, 2003. Vol. 91, Iss. 12. P. 2043–2067. <https://doi.org/10.1109/jproc.2003.819610>.
2. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.
3. Координированное управление дорожным движением / Ю. А. Врубель [и др.]. Минск: БНТУ, 2011. 230 с.
4. Капский, Д. В. Совершенствование применения периферийных устройств при модернизации АСУ дорожным движением / Д. В. Капский, Д. В. Рожанский, Д. В. Навой // *Безпека дорожнього руху України*. 2006. № 1–2. С. 112–120.
5. Капский, Д. Рекомендации по разработке режимов светофорного регулирования на пешеходных переходах / Д. Капский, Е. Кот // *Transport and Telecommunication*. 2006. Т. 7, № 3. С. 496–503.
6. Капский, Д. В. Проведение исследований интенсивности движения транспортных потоков: теория и эксперимент / Д. В. Капский, Д. В. Рожанский, Д. В. Мозалевский // *Безпека дорожнього руху України*. 2006. Т. 23, № 3–4. С. 35–40.
7. Мочалов, В. В. Влияние на безопасность движения автоматических телематических систем / В. В. Мочалов, А. Я. Андреев, Д. В. Капский // *Вместе к эффективному дорожному движению: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–31 окт. 2008 г.* / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: А. С. Калиниченко [и др.]. Минск, 2008. С. 136–145.
8. Discrete Choice Methods and their Applications to Short Term Travel Decisions / M. Ben-Akiva, M. Bierlaire, R. W. Hall (ed.) // *Handbook of Transportation Science. International Series in Operations Research & Management Science*. 1999. Vol. 23. P. 5–33. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5203-1_2/
9. A Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problems: Specification and Some Calibration Results for Interurban Networks / E. Cascetta [et al.] // *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. France: Lyon, 1996. P. 697–711.
10. Robertson, D. I. TRANSYT: a Traffic Network Study Tool: Road Research Laboratory Report LR 253 / D. I. Robertson. Crowthorne, Berkshire, 1969.
11. Lowrie, P. R. SCATS – Principles, Methodology and Algorithms / P. R. Lowrie // *Proceedings of the International Conference on Road Traffic Signalling*. United Kingdom: London, 1982. P. 67–70.
12. SCOOT – a Traffic Responsive Method of Co-Ordinating Signals / P. B. Hunt [et al.]: TRRL Report 1014. Crowthorne, Berkshire, England, 1981. 44 p.
13. Gartner, N. H. OPAC: a Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control / N. H. Gartner // *Transportation Research Record* 906. 1983. P. 75–81.
14. Henry, J. J. PROLYN / J. J. Henry, J. L. Farges // *Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications in Transportation*. France: Paris, 1989. P. 253–255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037025-5.50043-8>.
15. Di Taranto, C. UTOPIA / C. Di Taranto, V. Mauro // *Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications in Transportation*. France, Paris, 1989. P. 245–252. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037025-5.50042-6>.
16. Head, K. L. Hierarchical Framework for Real-Time Traffic Control / K. L. Head, P. B. Mirchandani, D. Sheppard // *Transportation Research Record* 1360. 1992. P. 82–88.
17. Van Katwijk, R. T. Multi-Agent Look-Ahead Traffic-Adaptive Control. / R. T. Van Katwijk. Netherlands, Delft: Delft University of Technology, 2008. 173 p.
18. Tassiulas, L. Stability Properties of Constrained Queueing Systems and Scheduling Policies for Maximum Throughput in Multihop Radio Networks / L. Tassiulas, A. Ephremides // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1992. Vol. 37, Iss. 12. P. 1936–1948. <https://doi.org/10.1109/9.182479>.

19. Smith, M. J. A Local Traffic Control Policy Which Automatically Maximises the Overall Travel Capacity of an Urban Road Network / M. J. Smith // *Traffic Engineering + Control*. 1980. Vol. 21, No 6. P. 298–302.
20. Smith, M. J. Traffic Signal Control and Route Choice: a New Assignment and Control Model Which Designs Signal Timings / M. J. Smith // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. Vol. 58. P. 451–473. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.002>.
21. Varaiya, P. A Universal Feedback Control Policy for Arbitrary Networks of Signalized Intersections / P. Varaiya // EECs, UC Berkeley. 2009.
22. Varaiya, P. Max Pressure Control of a Network of Signalized Intersections / P. Varaiya // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013. Vol. 36. P. 177–195. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.08.014>.
23. Distributed Traffic Signal Control for Maximum Network Throughput / T. Wongpiromsarn [et al.] // *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE. 2012. P. 588–595. <https://doi.org/10.1109/itsc.2012.6338817>.

Поступила 05.03.2018

Подписана в печать 14.05.2018

Опубликована онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Papageorgiou M., Kiakaki C., Dinopoulou V., Kotsialos A., Wang Yibing/ Review of Road Traffic Control Strategies / M. Papageorgiou [et al.]. *Proceedings of the IEEE*, 2003. 91 (12) P. 2043–2067. <https://doi.org/10.1109/jproc.2003.819610>.
2. Vruble' Yu. A., Kapsky D. V., Kot E. N. (2006) *Determination of losses in Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 240 (in Russian).
3. Vruble' Yu. A., Kapskii D. V., Rozhanskii D. V., Navoi D. V., Kot E. N. (2011) *Coordinated Control of Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 230 (in Russian).
4. Kapsky D. V., Rozhansky D. V., Navoy D. V. (2006) Improvement in Application of Peripheral Devices while Modernizing Automatic Control Systems for Road Traffic. *Bezpeka Dorozhniogo Rukhu Ukrainy* [Traffic Safety in Ukraine], (1–2), 112–120 (in Russian).
5. Kapsky D., Kot E. (2006) Recommendations on Development of Traffic Signalization Modes at Pedestrian Crossings. *Transport and Telecommunication*, (7) 3, 496–503 (in Russian)
6. Kapsky D. V., Rozhansky D. V., Mozalevsky D. V. (2006) Study of Traffic Flow Intensity: Theory and Experiment. *Bezpeka Dorozhniogo Rukhu Ukrainy* [Traffic Safety in Ukraine], 23 (3–4), 35–40 (in Russian).
7. Mochalov V. V., Andreev A. Ya., Kapsky D. V. (2008) Influence of Automotive Telematics System Movement on Safety. *Vmeste k Effektivnomu Dorozhnomu Dvizheniyu: Sb. Nauch. St. Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Minsk, 28–31 Okt. 2008 g.* [Together to Efficient Road Traffic: Collection of Scientific Papers. International Scientific and Practical Conference, Minsk, October 28–31, 2008]. Minsk, Belarusian National Technical University, 136–145 (in Russian).
8. Ben-Akiva M., Bierlaire M., Hall R. W. (1999) Discrete Choice Methods and their Applications to Short Term Travel Decisions. *Handbook of Transportation Science. International Series in Operations Research & Management Science*, 5–33. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5203-1_2.
9. Cascetta E., Nuzzolo A., Russo F., Vitetta A. (1996) A Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problems: Specification and Some Calibration Results for Interurban Networks. *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. France, Lyon, 697–711.
10. Robertson D. I. (1969) TRANSYT: a Traffic Network Study Tool. Road Research Laboratory Report LR 253. Crowthorne, Berkshire.
11. Lowrie P. R. (1982) SCATS – Principles, Methodology and Algorithms. *Proceedings of the International Conference on Road Traffic Signalling*. United Kingdom, London, 67–70.
12. Hunt P. B., Robertson D. I., Bretherton R. D., Winton R. I. (1981) *SCOOT – a Traffic Responsive Method of Coordinating Signals*. Report TRRL 1014 Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne, Berkshire, England. 44.
13. Gartner N. H. (1983) OPAC: a Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control. *Transportation Research Record*, (906), 75–81.
14. Henry J. J., Farges J. L. (1989) PROLYN. *Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications in Transportation*. France, Paris, 253–255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037025-5.50043-8>.
15. Di Taranto C., Mauro V. (1989) UTOPIA. *Proceedings of the 6th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Control, Computers, Communications in Transportation*. France, Paris, 245–252. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-037025-5.50042-6>.
16. Head K. L., Mirchandani P. B., Sheppard D. (1992) Hierarchical Framework for Real-Time Traffic Control. *Transportation Research Record*, (1360), 82–88.
17. Van Katwijk R. T. (2008) *Multi-Agent Look-Ahead Traffic-Adaptive Control*. Netherlands, Delft, Delft University of Technology. 173.
18. Tassioulas L., Ephremides A. (1992) Stability Properties of Constrained Queueing Systems and Scheduling Policies for Maximum Throughput in Multihop Radio Networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37 (12), 1936–1948. <https://doi.org/10.1109/9.182479>.
19. Smith M. J. (1980) A Local Traffic Control Policy Which Automatically Maximises the Overall Travel Capacity of an Urban Road Network. *Traffic Engineering + Control*, 21 (6), 298–302.
20. Smith M. J. (2015) Traffic Signal Control and Route Choice: a New Assignment and Control Model Which Designs Signal Timings. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 451–473. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.002>.
21. Varaiya P. (2009) *A Universal Feedback Control Policy for Arbitrary Networks of Signalized Intersections*. EECs, UC Berkeley.
22. Varaiya P. (2013) Max Pressure Control of a Network of Signalized Intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, (36), 177–195. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.08.014>.
23. Wongpiromsarn T., Uthacharoenpong T., Yu Wang, Frazzoli E., Danwei Wang (2012) Distributed Traffic Signal Control for Maximum Network Throughput. *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 588–595. <https://doi.org/10.1109/itsc.2012.6338817>.

Received: 05.03.2018

Accepted: 14.05.2018

Published online: 28.09.2018