

УДК 681.5.01

UDC 681.5.01

**МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В УСЛОВИЯХ ГОРОДА НА ОСНОВЕ МЕЗО-МОДЕЛИ ДИНАМИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ****HIGH DENSITY TRAFFIC FLOW ADAPTIVE CONTROL METHOD FOR URBAN NETWORKS USING GENETIC ALGORITHM OPTIMIZATION WITH TRAFFIC DYNAMIC MESO-MODEL**

Посмитный Евгений Владимирович  
к.т.н., доцент

Posmitniy Evgeniy Vladimirovich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor

Медовщикова Максим Игоревич  
аспирант  
*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия*

Medovschikov Maxim Igorevich  
postgraduate student  
*Kuban state university of technology, Krasnodar, Russia*

В статье рассматривается методика адаптивного управления транспортными потоками высокой интенсивности в условиях города. Проведен обзор динамических моделей потоков, а также методов оптимизации процесса управления потоками. Проведено исследование применения генетических алгоритмов при оптимизации и моделирования динамики транспортных потоков. В результате рассчитаны показатели эффективности адаптивного управления с применением рассмотренных методов по сравнению с иными видами управления транспортными потоками

In this article, the high density traffic flow adaptive control method for urban networks is considered. The analytical survey for dynamic traffic models, urban traffic models synthesis, and optimization methods is performed. The genetic algorithm optimization with traffic dynamic meso-model is investigated. As the result of this work, the efficiency indicators of adaptive control are evaluated

Ключевые слова: ТРАНСПОРТНЫЙ ПОТОК, АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ, МЕЗО-МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ, SUMO

Keywords: TRAFFIC FLOW, ADAPTIVE CONTROL, GENETIC ALGORITHMS, DYNAMICS MESO-MODEL, SUMO

Проблема транспортных заторов в мегаполисах известна ещё с первой половины XX века. Первые системные исследования этой проблемы относятся к фундаментальным в данной области работам Вардропы, Найта, Лайтхилла и Уизема [13, 15, 16]. С тех пор было разработано множество методов регулирования транспортных потоков, подходов к моделированию динамики перекрёстков и методов оптимизации параметров светофорных объектов.

Объектом научной работы является совокупность транспортных потоков (ТП) в условиях городской сети. Предметом работы является процесс управления ТП путём изменения параметров светофорных объектов. Целью научной работы является оптимизация процесса управления ТП с применением современных научных подходов, в частности генетических

алгоритмов и мезо-модели динамики транспортных потоков. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: провести аналитический обзор методов управления ТП, а также используемых динамических моделей ТП; исследовать применение современных подходов к управлению, в частности адаптивного управления с применением генетических алгоритмов, а также исследовать современные оптимизационные модели, в частности мезо-модель с использованием пакета моделирования SUMO; а также оценить эффективность рассмотренных методов по сравнению с другими.

## **1 Состояние исследований и актуальность работы**

### **1.1 Подходы к управлению транспортными потоками**

На сегодняшний день при управлении транспортными потоками применяется множество различных методов, от наиболее старых, до наиболее современных: независимое жёсткое управление перекрёстком (наиболее традиционный метод, не учитывающий состояние других перекрёстков; используется метод Вебстера [17]); независимое управление перекрёстком по информации с детекторов транспорта; фиксированное координированное управление (составляется для различных условий: день, ночь, утро, вечер, день недели, выходной или рабочий, время года и т.п.; метод имеет название TRANSYT и был разработан в Великобритании в 1960-х годах [11]; в отечественной литературе метод называется методом зелёной волны [18]); автоматизированное координированное управление (светофорными объектами, СО, управляют дорожные контроллеры, ДК, которые сами выбирают предварительно рассчитанную программу координированного управления, ПКУ, по показаниям с детекторов транспорта,

ДТ [13]; метод применяется в большинстве отечественных АСУДД [19]); параметрическое адаптивное управление (ПКУ формируется однократно, задавая таким образом структуру управления, далее по данным с ДТ производится регулирование параметров СО с учётом динамики движения транспортных потоков и их влияния на интегральные показатели качества управления; так работает большинство зарубежных АСУДД, к примеру SCOOT [1]); структурное адаптивное управление (АСУДД полностью автоматически формирует структуру управления и параметры работы СО; данный метод является наиболее затратным относительно производительности и применяется в наиболее современных зарубежных АСУДД [13]).

Выбор метода управления зависит от степени загруженности транспортной сети. В случае перегруженной транспортной системы эффективными являются только адаптивные методы управления [1]. Таким образом, рассматривая задачу оптимизации управления ТП в мегаполисе актуально рассматривать структурное адаптивное управление.

## **1.2 Модели динамики транспортных потоков**

Первая модель динамики транспортных потоков была разработана в 1960-х годах Лайтхиллом и Уиземом [15] на основе методов гидродинамики. В последствии такие модели были отнесены к классу макромоделей. Главным преимуществом макромоделей по настоящее время остаётся скорость расчёта показателей управления. Главным недостатком данных моделей является слабая точность в предзаторных и заторных условиях движения. Даже современные модификации, с учётом фаз движения ТП [4], не позволяют учитывать такие эффекты как фантомные заторы, а также сложные узлы топологии транспортной сети.

В противовес макромоделям были разработаны микромоделей. Известными являются модель движения за лидером, модель клеточных авто-

матов Нагеля [10] и модель разумного водителя Трайбера [14]. Главным достоинством данных моделей является существенно большая точность и гибкость, позволяющая производить моделирование ТП с наиболее сложными топологиями транспортной сети. Главным недостатком является высокая вычислительная сложность, не позволяющая использовать данный класс моделей при адаптивном управлении в реальном времени [9].

Наиболее перспективным компромиссом являются мезо-модели динамики [6]. Данные модели строятся на основе теории массового обслуживания с использованием данных, полученных при исследовании микромоделей. Такие модели позволяют существенно повысить скорость расчёта при умеренном снижении точности получения показателей качества управления.

При моделировании важно учитывать топологию транспортной сети города. Для формирования интегральных моделей, позволяющих производить расчёт показателей качества управления, а также оптимизацию параметров СО, используются специализированные пакеты, такие как: TRANSYT-7F, SUMO (Simulation of Urban Mobility), PTC VISSIM, MITSIMLab (Microscopic Simulation Laboratory), PASSER, PROGO, Synchro, TEAPAC, TS/PP-Draft. Дательный анализ возможностей представленных пакетов можно найти в отчёте проекта Smartest [3]. К сожалению, большинство пакетов труднодоступно для исследования ввиду закрытости исходного кода и платной лицензии. В представленных пакетах только пакет SUMO является свободным ПО. Поэтому в настоящей статье может быть рассмотрен только данный пакет.

## 2 Постановка задачи экстремального управления транспортными потоками

Процесс адаптивного управления транспортными потоками предполагает оптимизацию параметров СО в реальном времени. Такой класс задач относится к задачам экстремального управления. Для построения целевой функции оптимизации необходимо рассмотреть используемую модель динамики транспортных потоков. Одной из наиболее современных моделей является модель Осорио [6]:

$$I_i = g_i + \frac{\sum_j p_{ji} \cdot I_j \cdot (1 - P(N_j = k_j))}{(1 - P(N_i = k_i))}; \quad \frac{1}{\hat{m}_i} = \sum_{j \in DI} \frac{I_j \cdot (1 - P(N_j = k_j))}{I_i \cdot (1 - P(N_i = k_i)) \cdot \hat{m}_j}; \quad (1)$$

$$\frac{1}{\hat{m}_i} = \frac{1}{m_i} + P_i^f \cdot \frac{1}{\hat{m}_i}; \quad \frac{1}{\hat{m}_i} = \sum_j p_{ij} \cdot P(N_j = k_j); \quad p_i = \frac{I_i}{\hat{m}_i}.$$

где:  $\gamma_i$  – оценка суммы внешних прибывающих ТП к  $i$ -му ТП;  $\lambda_i$  – оценка суммы всех прибывающих ТП к  $i$ -му ТП;  $\mu_i$  – оценка пропускной способности  $i$ -го ТП;  $\alpha_i$  – оценка степени разблокировки затора  $i$ -го ТП;  $\beta_i$  – оценка эффективной пропускной способности  $i$ -го ТП;  $P_i^f$  – вероятность появления заторного эффекта в  $i$ -м ТП;  $p_{ij}$  – вероятность перехода ТС из  $i$ -го ТП в  $j$ -й ТП;  $k_i$  – ёмкость  $i$ -го ТП (максимальное количество ТС);  $N_i$  – текущее общее количество ТС в  $i$ -м ТП;  $P(N_i = k_i)$  – вероятность достижения ёмкости  $i$ -го ТП (вероятность затора);  $j \in DI$  – множество ТП, в которые впадает  $j$ -й ТП.

Представленная модель (1) была реализована в виде класса C++ и интегрирована в пакет SUMO в соответствии с инструкциями по сборке SUMO. Интеграция в SUMO позволяет рассчитывать общие показатели качества управления, такие как:

$V_a$  – средняя скорость проезда в транспортной сети, км/ч;

$T_w$  – среднее время ожидания транспортных средств на участках сети, с;

$S_v$  – общее количество остановок транспортных средств в сети;

$Q_c$  – суммарная интенсивность движения транспортных средств на входных участках транспортной сети, авт/ч;

$Q_s$  – суммарная интенсивность движения транспортных средств на всех участках транспортной сети, авт/ч.

Таким образом, целевая функция имеет следующий вид:

$$I(M_{is}) = W_V \Theta_V + W_T \Theta_T + W_S \Theta_S + W_{Qc} \Theta_{Qc} + W_{Qs} \Theta_{Qs} + W_P (\sum W_{py} IP_y(M_{is})); \quad (2)$$

$$W_V + W_T + W_S + W_{Qc} + W_{Qs} + W_P = 1; \quad \sum W_{py} = 1;$$

$$\Theta_V = \frac{V_a}{V_{\max}}; \quad \Theta_T = \begin{cases} 1 - \frac{T_w}{T_{w\max}}, & T_w \leq T_{w\max} \\ 0, & T_w > T_{w\max} \end{cases}; \quad \Theta_S = \begin{cases} 1 - \frac{S_v}{S_{\max}}, & S_v \leq S_{\max} \\ 0, & S_v > S_{\max} \end{cases}; \quad \Theta_{Qs} = \frac{Q_s}{Q_s^{\max}};$$

$$Q_s^{\max} = P_{\max} \cdot \sum_{i=1}^{N_{tf}} V_{\max,i} NL_i; \quad \Theta_{Qc} = \frac{Q_c}{Q_c^{\max}}; \quad Q_c^{\max} = P_{\max} \cdot \sum_{j=1}^{N_{jf}} V_{\max,j} NL_j$$

$$T_{w\max} = \frac{1}{N_{tf}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{tf}} T_{w\max,i}; \quad T_{w\max,i} = \frac{N_{tf,i}}{Q_i^{tf}} \cdot 3,6 \cdot 10^3;$$

$$S_{\max} = \frac{1}{N_{tf}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{tf}} S_{\max,i}; \quad S_{\max,i} = \frac{N_{tf,i}^{\max}}{N_{jtf,i}^{\min}}.$$

При этом задача экстремального управления для целевой функции (2) получает следующий вид:

$$I(M_{is}) \xrightarrow{M_{is}} \max; \quad T \min_{l,k}^{ph} \leq T_{l,k}^{ph}; \quad Tc_l^{is} = \sum_k T_{l,k}^{ph}; \quad Tc_{\min} \leq Tc_l^{is} \leq Tc_{\max}; \quad (3)$$

$$0 \leq Ts_l^{is} \leq Tc_l^{is}; \quad M_{is}(X), X \in N.$$

где:  $M_{is}$  – матрица перекрёстков (4.18) (управляющее воздействие);

$M_{is}(X), X \in N$  – все элементы матрицы  $M_{is}$  и элементы матриц, входящих в состав матрицы  $M_{is}$ , относятся к пространству натуральных чисел;

$T_{l,k}^{ph}$  – время активности светофорной фазы (4.19), с;

$T \min_{l,k}^{ph}$  – минимальное допустимое время светофорной фазы, с;

$Tc_l^{is}$  – время полного цикла фаз светофорного объекта (СО) на перекрёстке, с;

$Tc_{\min}$  – минимальное допустимое время  $Tc_l^{is}$ , с;

$Tc_{\max}$  – максимальное допустимое время  $Tc_l^{is}$ , с;

$Ts_l^{is}$  – время смещения цикла фаз СО относительно общего времени отсчёта транспортной системы, с;

$isn$  – количество перекрёстков,  $l = \overline{1, isn}$ ;

$phn_l$  – количество светофорных фаз  $l$ -го перекрёстка,  $k = \overline{1, phn_l}$ .

Таким образом, поставленная задача является задачей многомерной глобальной условной целочисленной комбинаторной оптимизации.

Важно перечислить следующие свойства целевой функции (ЦФ):

- ЦФ является неаддитивной и не может быть сведена к совокупности вложенных задач оптимизации;
- ЦФ является дискретной;
- ЦФ при сведении к непрерывной имеет разрывы, поэтому, как следствие, не дифференцируема;
- ЦФ является мультимодальной;
- Параметры ЦФ являются целочисленными.

### 3 Методика адаптивного управления с применением генетических алгоритмов

Для решения поставленной задачи могут быть использованы следующие методы: метод ветвей и границ; метод имитации отжига; генетические

алгоритмы; муравьиный алгоритм; метод роя частиц [5]. Метод ветвей и границ слабо применим для нахождения оптимальных значений поставленной задачи ввиду специфических особенностей расчёта показателей, использующих имитационное моделирование. Метод имитации отжига (а также иные методы из класса методов Монте-Карло) обладает слабой сходимостью. Методы генетических алгоритмов, муравьиного алгоритма и роя частиц относятся о одному классу методов эволюционной оптимизации. Особенностью этих методов является высокая сходимость. При этом генетические алгоритмы нашли наиболее широкое применение при оптимизации параметров СО в АСУДД [2].

Контур адаптивного управления и блок-схема генетического алгоритма представлены на рисунке 1.

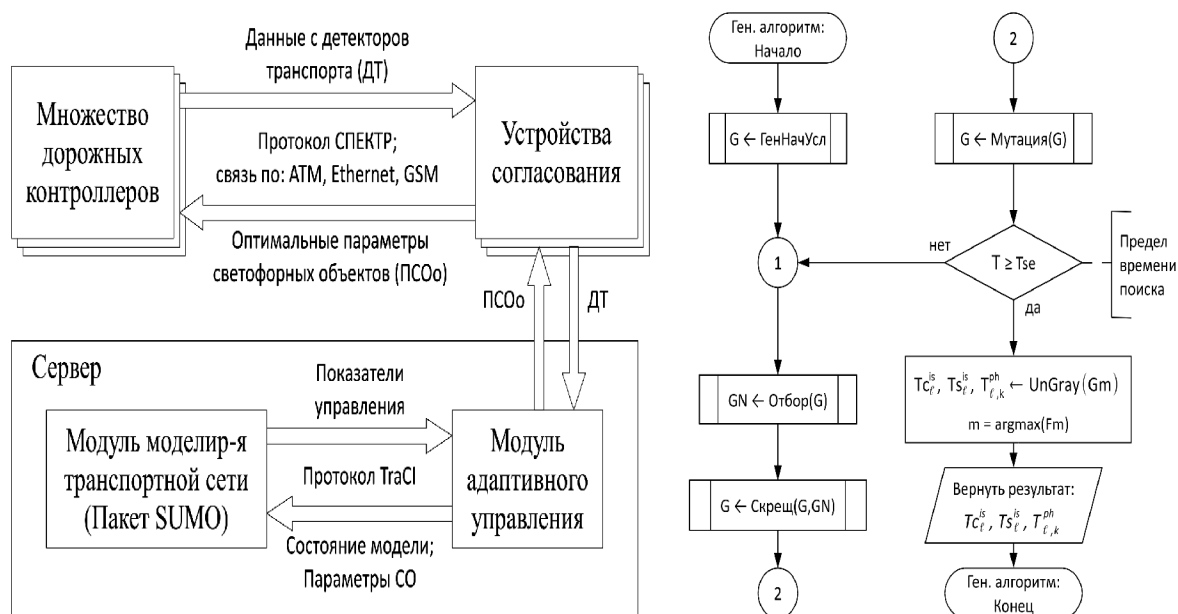


Рисунок 1 – контур адаптивного управления и блок-схема генетического алгоритма

При этом блок-схема оператора расчёта функции приспособленности имеет вид, приведённый на рисунке 2.



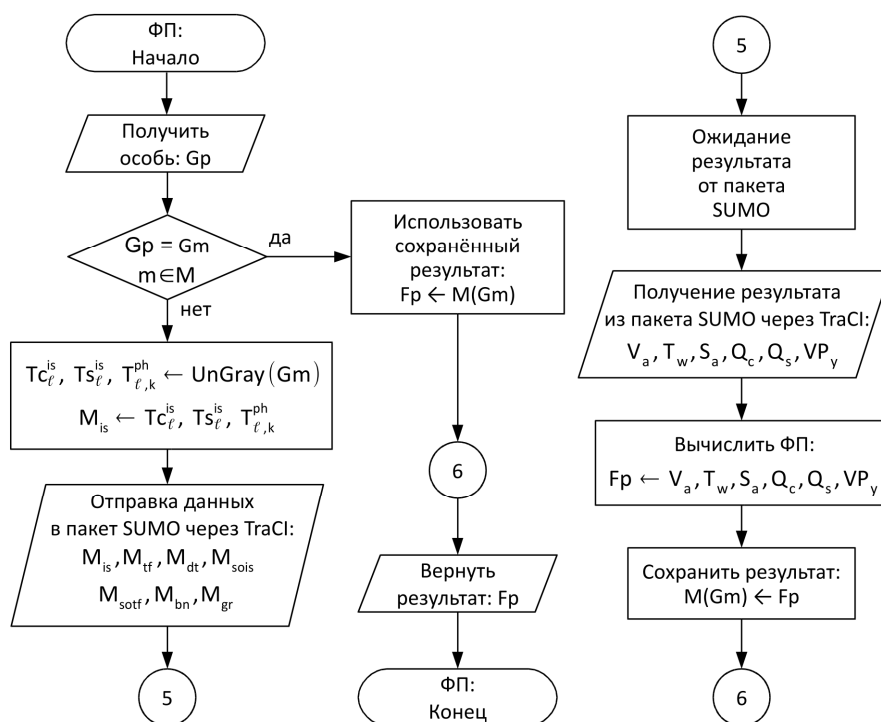


Рисунок 2 – блок-схема оператора расчёта функции приспособленности

Отправка данных в пакет SUMO производится по протоколу TraCI [12]. Отбор в популяции производится турнирным методом [8]. Скрещивание генов производится методом поэлементной замены. Оптимизируемые аргументы закодированы с использованием кода Грэя [7].

## Заключение и выводы

Наиболее важными показателями качества управления являются среднее время проезда в транспортной сети, а также среднее время ожидания на перекрёстка. На рисунке 3 представлены результаты сравнения показателей качества при традиционном управления с жёстко заданной программой координированного управления (тёмная синяя линия) и адаптивного управления с применением генетических алгоритмов и использованием мезо-модели динамики ТП, встроенной в пакет SUMO (светлая красная линия).

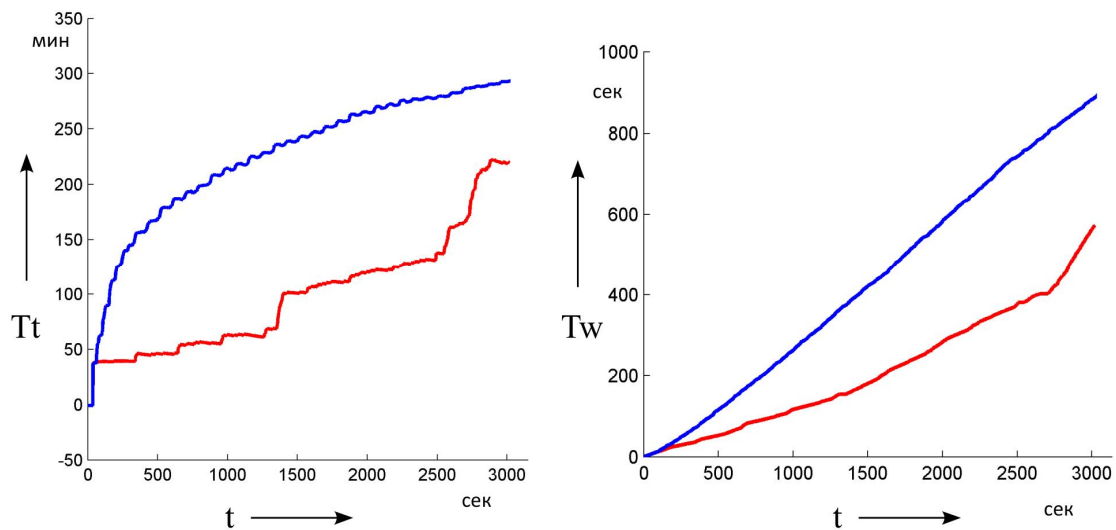


Рисунок 3 – динамика среднего времени проезда ( $T_t$ ) и среднего времени ожидания на перекрёстке ( $T_w$ )

Таким образом, из рисунка 3 видно, что адаптивное управление в процессе загрузки транспортной сети увеличивает эффективность управления по сравнению с традиционными методами от 14 % до 52 %.

## Литература

1. Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice [Text] // Transportation research board. Ser. NCHRP Synthesis 403. — WASHINGTON, D.C., US: 2010. — P. 1–105.
2. Almasri, E. A new offset optimization method for signalized urban road networks [Text] : Dissertation : Doctor of engineering : Date of examination 18.04.2006 / Essam Almasri — University of Hanover, 2006. — 165 p.
3. Analysis of Micro-Simulation Tools [Electronic resource] // The Smartest Project. — Mode of access: <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/append3d.html> (accessed date: 15.04.2012).
4. Kerner, B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-phase Traffic Theory [Text] / B.S. Kerner. — Springer, 2009. — 271 p. — ISBN 978-3-642-02605-8.
5. Kesur, K. Advances in Genetic Algorithm Optimization of Traffic Signals [Text] / K. Kesur // Journal of Transportation Engineering. — 2009. — Vol. 135, № 4. — P. 160–173.
6. Osorio, C. A surrogate model for traffic optimization of congested networks: an analytic queueing network approach [Text] / C. Osorio, M. Bierlaire // Report TRANSP-OR. — 2009. — Vol. 90825. — P. 1–23.

7. Park, B. A genetic algorithm-based signal optimization program for oversaturated intersections [Text] / B. Park // Towards the new horizon together. Proceedings of the 5th world congress on intelligent transport systems, held 12-16 october 1998, seoul, korea. Paper no. 1026. — 1998. — ISBN 89-950073-2-X.
8. Park, B. Evaluation of traffic signal timing optimization methods using a stochastic and microscopic simulation program [Text] : Report on Federally Funded Project / B. Park, J.D. Schneeberger // Virginia Transportation Research Council. — 2002. — 33 p.
9. Prothmann, H. Organic Traffic Control [Text] : Dissertation : Date of examination 15.07.2011 / Prothmann Holger — Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), 2011. — 279 p. — ISBN 978-3-86644-725-7.
10. Rickert, M. Two lane traffic simulations using cellular automata [Text] / M. Rickert, K. Nagel, M. Schreckenberg, A. Latour // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 1996. — Vol. 231, № 4. — P. 534–550.
11. Robertson, D.I. Transyt: A traffic network study tool [Text] / D.I. Robertson; Road Research Laboratory [UK]. — Highway Safety Literature, 1969. — 43 p.
12. TraCI [Electronic resource] // SUMO - Simulation of Urban Mobility. — [2012]. — Mode of access: <http://sumo.sourceforge.net/doc/current/docs/userdoc/TraCI.html> (accessed date: 20.05.2012).
13. Traffic control systems handbook [Text] / U.S.F.H. Administration, P.-W. and Associates. — US: The Administration, 2005. — 478 p.
14. Treiber, M. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations [Text] / M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing // Physical Review E. — 2000. — Vol. 62, № 2. — P. 1805–1824.
15. Гасников, А.В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков [Текст] : учеб. пособие / А.В. Гасников, С.Л. Кленов, Е.А. Нурминский, Я.А. Холодов, [и др.]; под ред. А.В. Гасникова. — М.: МФТИ, 2010. — 360 с. — ISBN 978-5-7417-0334-2.
16. Иносэ, Х. Управление дорожным движением [Текст] / Х. Иносэ, Т. Ха-мада; пер. М.П. Печерского; под ред. М.Я. Блинкина. — М.: Транспорт, 1983. — 248 с.
17. Капитанов, В.Т. Управление транспортными потоками в городах [Текст] / В.Т. Капитанов, Е.Б. Хилажев. — М.: Транспорт, 1985. — 94 с.
18. Кременец, Ю.А. Технические средства организации дорожного движения [Текст] : Учебник для вузов / Ю.А. Кременец. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. — 279 с. — ISBN 5-94628-111-9.
19. Петров, В.В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах [Текст] : Учебное пособие / В.В. Петров. — Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. — 104 с. — ISBN 978-5-93204-322-6.