

УДК 658.7

А. В. ПОПОВ, М. В. ИВАНОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Поставлена и решена логистическая задача оптимизации транспортных потоков внутри города для нахождения маршрута между заранее заданными пунктами. Построен алгоритм генерации ориентированных графов для анализа алгоритмов поиска кратчайших маршрутов использующий поиск ближайших соседей в двумерной матрице. Разработан метод декомпозиции графа. Предложена методика для организации хранения данных построенного графа. Разработана система мониторинга транспорта, использующая индуктивные датчики. Представленный подход можно использовать для оптимизации транспортных потоков в логистике.

Ключевые слова: логистика, транспортные потоки, алгоритм маршрутизации, геоинформационная система, мониторинг транспорта.

Введение

Экономическое развитие современных предприятий связано с увеличением количества производственных филиалов на территории Украины. В то же время руководящие кадры промышленного предприятия всегда стремятся сократить расходы и увеличить прибыль. Исходя из этого, под оптимизацию расходов попадают все службы, в том числе и транспортные службы на производственных предприятиях.

Логистическая оптимизация транспортных потоков связана с оптимизацией не только ресурсов (людские ресурсы, топливо), но и функциональной оптимизацией (оптимизация транспортных маршрутов). Поэтому актуальна тема данной публикации.

Постановка задачи исследования

Рассмотрение задачи оптимизации транспортного потока на локальном уровне не позволит решить её в полной мере, следовательно, необходимо искать решение на глобальном уровне. В рассматриваемом подходе, для решения транспортной задачи в качестве объекта исследования анализируется транспортная сеть города.

Поставленная задача имеет множество путей решений, но общим для всех является разработка геоинформационной системы (ГИС), взаимодействующей с системой мониторинга транспорта (СМТ). ГИС служит для формирования геоданных (картографирование, создание дорожных графов, сбор статистики и т.д.), а СМТ обеспечивает учет текущего транспортного потока на участке дороги, на котором

она находится, что позволит избежать очередей транспортного потока и сформировать показатели, опираясь на которые, можно построить оптимальный маршрут движения транспорта.

Разработка ГИС включает в себя несколько этапов:

- 1) анализ и выбор алгоритмов поиска кратчайших маршрутов (можно использовать: алгоритмы Дейкстры, Флойда, муравьиный алгоритм);
- 2) представления транспортной системы в виде ориентированного графа (в качестве узлов и промежуточных точек выступают перекрестки и места деформации дороги) с помощью теории множеств;
- 3) подключение системы мониторинга.
- 4) интеграция разрабатываемой системы в реальную транспортную сеть.

При построении дорожного графа используются полученные результаты анализа, проведенные с учетом выбранных критериев, которые в дальнейшем используются для поиска и оптимизации маршрутов.

Анализ алгоритмов показывает, что использование как классических, так и эвристических методов не всегда эффективно в задачах маршрутизации.

Описание различных систем мониторинга транспорта можно найти в [1, 2], где описаны основные подходы к применению систем такого типа.

В работе предложено создать геоинформационную систему, которая в дальнейшем позволит оптимизировать транспортные потоки внутри города для обеспечения оптимального распределения логистического потока.

Решение задачи исследования

Существует множество различных методов поиска кратчайших маршрутов таких как:

1. Классические [3-5] (алгоритм Дейкстры, Флойда-Уоршела и т.д.).
2. Эвристические [6,7] (алгоритм A*, муравьиный алгоритм, генетический алгоритм).

Проанализируем алгоритм Дейкстры, Белмана-Форда и Флойда-Уоршела.

Исходя из [3-5] можно дать краткую характеристику этих алгоритмов (табл. 1).

В табл. 1 под *сложностью* понимается – сложность работы алгоритма в случае представления графа в виде матрицы смежности; под *доп. памятью* – количество дополнительной памяти необходимой для выполнения алгоритма (матрица предков).

При исследовании алгоритмов поиска внимания уделено оценке их поведения на орграфах с различным множеством вершин.

Так как ручное создание больших графов является трудоёмким рассмотрим алгоритм по их генерации.

Основными шагами алгоритма генерации графа являются:

- *инициализация двумерного пространства* – формирование поля, с помощью которого, в дальнейшем, получим координаты узлов;
- *генерация вершин графа* – относительно заданной плотности и количества в матрице устанавливаются узлы;
- *формирование ребер* – используя алгоритм поиска ближайшего соседа, формируются дуги графа.

При выполнении алгоритма инициализации создается двумерная матрица заданной размерности, где все значение элементов установлены в «0».

Генерация вершин (рис. 1) основывается на значении предполагаемой плотности графа. Как видно из диаграммы первым шагом генерации является установка значения «1» на первой строке матрицы, с шагом, основанным на значении плотности. Далее построчно происходит аналогичное задание вершин, но установка узла происходит в том случае, если предполагаемый узел находится в столбце, с уже существующим узлом в первой строке матрицы. Алгоритм заканчивает своё выполнение тогда, когда число узлов достигает заданного значения, либо когда закончатся элементы матрицы.

На следующем этапе – формируются рёбра графа (рис. 2). Для этого с помощью цикла происходит перебор значений элементов матрицы.

Аналогичные операции происходят при поиске ближайшего элемента снизу. Для добавления ребер противоположного направления, произвольным образом добавляем ребро с поменянными местами (координатами) начала и конца. В результате проведенных операций, получаем ориентированный граф, пример которого представлен на рис. 5 (без координатной привязки).

Для анализа методов маршрутизации было разработано программное обеспечение с использованием языка java. Проведена генерация девяти ориентированных графов с помощью описанного выше алгоритма, исследовалась задача с размерностью в 100, 200, 300, 400, 500, 1000, 1500, 2000 и 2500 узлов.

Результаты анализа представлены в виде табл. 2 (анализ проводился в случае от одного ко всем и от всех ко всем).

Рассмотрим более подробно полученные результаты, при поиске от одного ко всем, представив их в виде графика временных зависимостей (рис. 3).

Таблица 1

Таблица сложностей алгоритмов

Алгоритм	Объект работы	Действие	Сложность	Дополнительная память
Алгоритм Дейкстры	Взвешенный граф без рёбер отрицательного веса	Поиск кратчайшего расстояния от одной вершины до всех остальных	$O(N^2)$	$O(N)$
Алгоритм Белмана-Форда	Взвешенный граф	Поиск кратчайшего расстояния от одной вершины до всех остальных	$O(N^3)$	$O(N)$
Алгоритм Флойда-Уоршела	Взвешенный граф	Поиск кратчайшего расстояния между каждой парой вершин	$O(N^3)$	$O(N^2)$

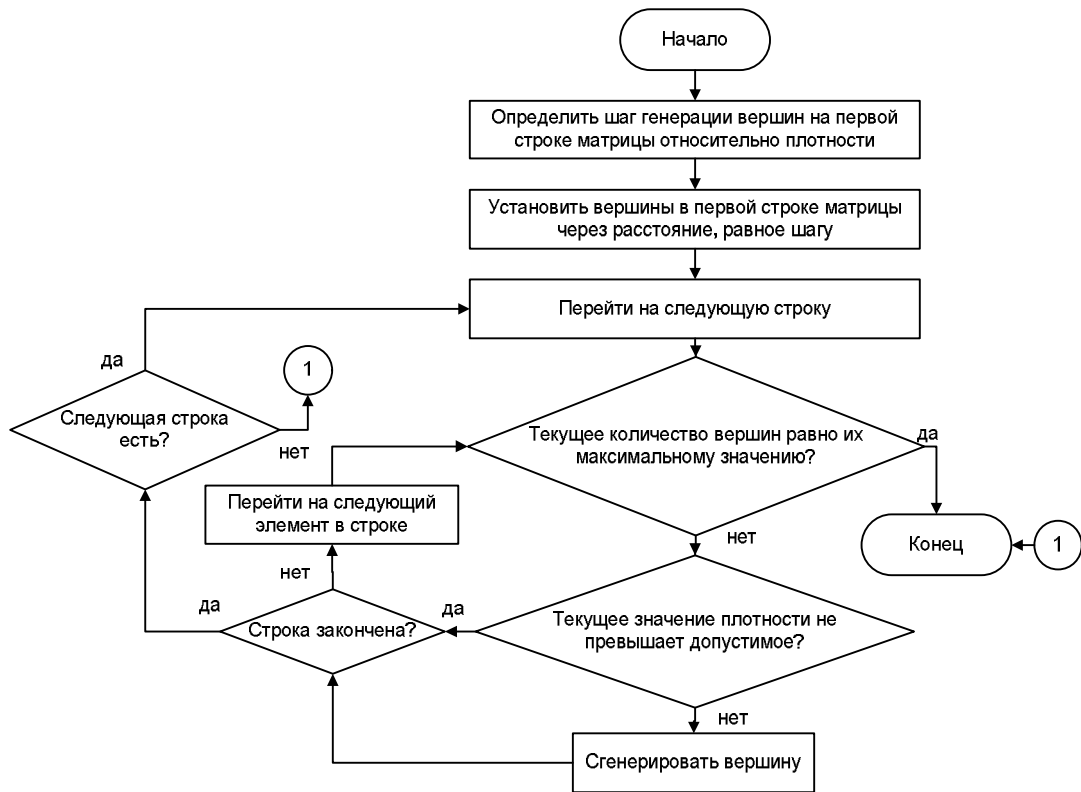


Рис. 1. Алгоритм генерация вершин графа

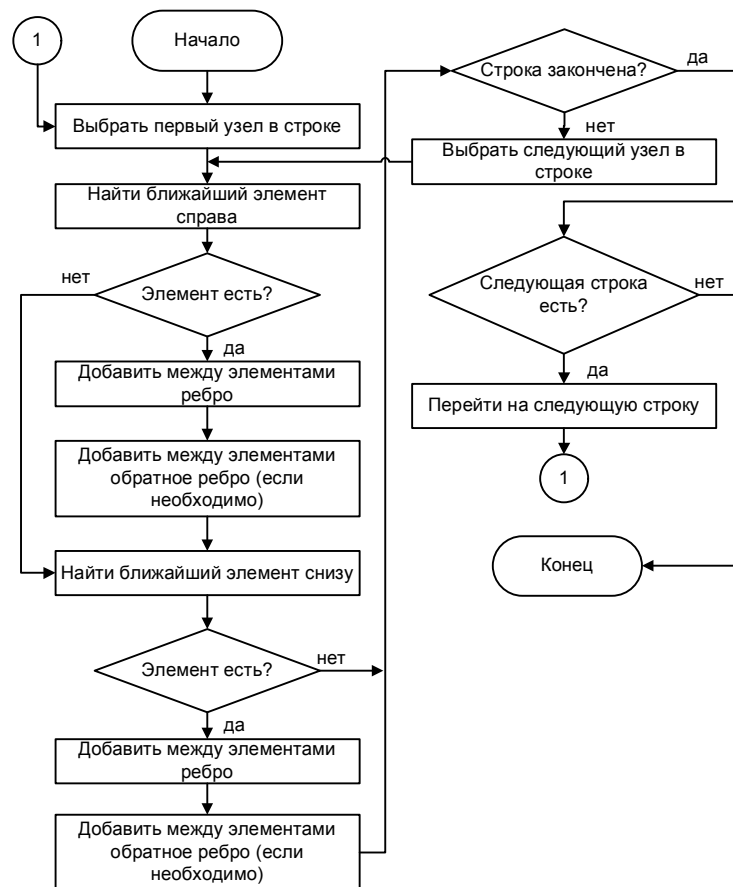


Рис. 2. Алгоритм формирования ребер

Таблиця 2

Результаты исследования алгоритмов

Узлы	Дейкстра от одного ко всем	Дейкстра от всех ко всем	Белман-Форд от одного ко всем	Белман-Форд от всех ко всем	Фloyd-Уоршел от всех ко всем
100	1703267	24356951	16159165	570758035	15080975
200	5133174	104757428	68361074	10456260500	54343598
300	5667445	312651428	197567870	58252070906	142605709
400	8666619	741757445	454268765	1,89772E+11	303672604
500	7389394	1409958419	917573701		585563869
1000	26779456	11019560022	22515173634		4881740651
1500	52209412	35064271222	77978663520		15931811352
2000	54171635	80414615774	1,95547E+11		37637695991
2500	86757352	1,52364E+11	3,84994E+11		73198200295

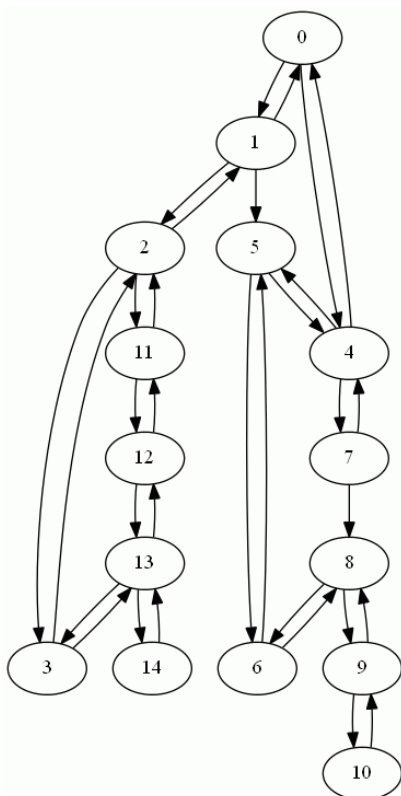


Рис. 3. Пример генерируемого графа

Из рисунка 4 видно, что алгоритм Белмана-Форда не является эффективным для использования в целях нахождения оптимальных маршрутов, так как время его выполнения значительно больше времени выполнения алгоритма Дейкстры (более подробный график представлен на рис. 5).

Далее, в виде графиков, представим результаты поиска от всех ко всем. На рис. 6 продемонстрирован график временных зависимостей алгоритмов Дейкстры, Белмана-Форда и Флойда-Уоршела. Как видно из графика, алгоритм Белмана-Форда демонстрирует такие же временные показатели, как и при предыдущем варианте поиска.

Далее были подробно рассмотрены алгоритмы

Дейкстры и Флойда-Уоршела (рис. 7-9). Анализ показал, что разница в их выполнении незначительна, но полученные маршрутные матрицы имеют разные показатели (длина маршрута одинакова, но используемые ребра для его прохождения разные).

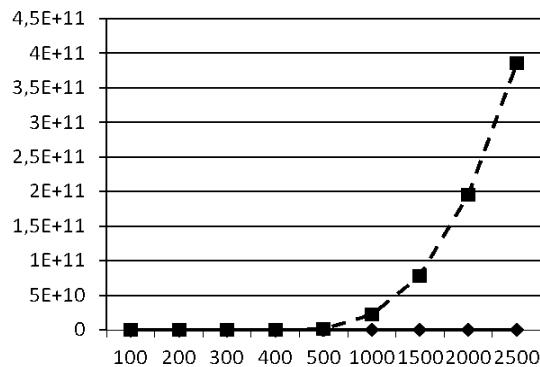


Рис. 4. График временной зависимости алгоритмов при поиске расстояния от «одного ко всем»:

—◆— алгоритм Дейкстры;
-■- алгоритм Беллмана – Форда

Следовательно, для такого типа поиска уместным является использование обоих алгоритмов для получения альтернатив.

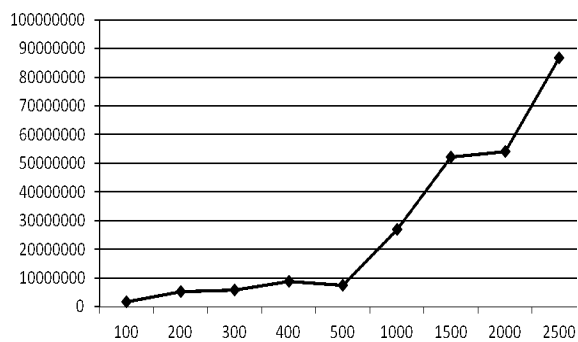


Рис. 5. График временной зависимости алгоритма Дейкстры при поиске расстояния «от одного ко всем»

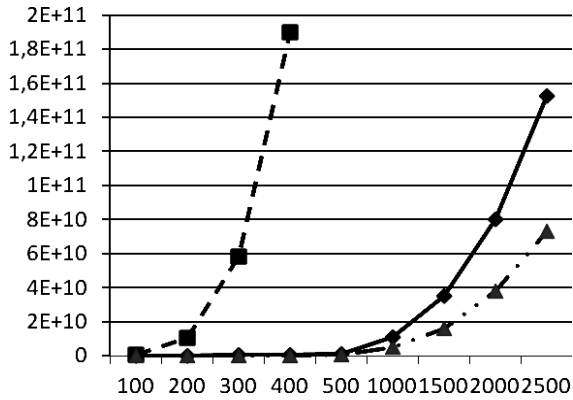


Рис. 6. График временной зависимости алгоритмов при поиске расстояния «от всех ко всем»:

- ◆ алгоритм Дейкстры;
- алгоритм Беллмана – Форда;
- ▲ алгоритм Флойда – Уоршелла

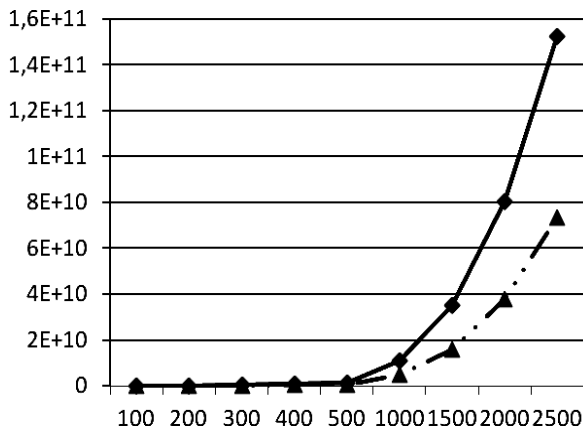


Рис. 7. График временной зависимости алгоритмов:

- ◆ алгоритм Дейкстры;
- ▲ алгоритм Флойда – Уоршелла

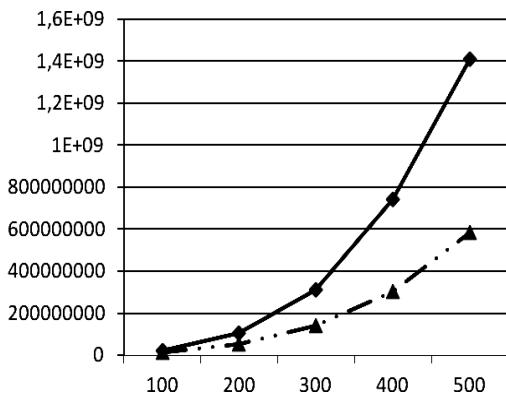


Рис. 8. График временной зависимости алгоритмов (до 1000 узлов):

- ◆ алгоритм Дейкстры;
- ▲ алгоритм Флойда – Уоршелла

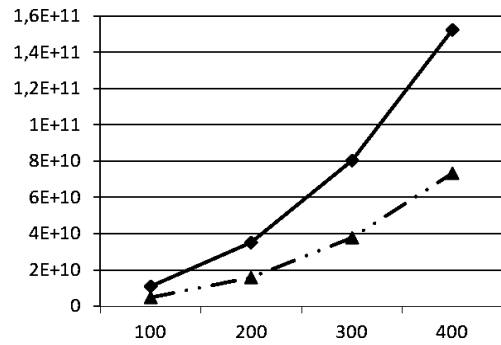


Рис. 9. График временной зависимости алгоритмов (после 1000 узлов):

- ◆ алгоритм Дейкстры;
- ▲ алгоритм Флойда – Уоршелла

Использование декомпозиции графа

Опираясь на теорию графов [8, 9], опишем способ представления графа, где он является набором вершин и ребер, но разделен на уровни. Пусть $\Omega = \bigcup_0^n G_i$ – полный граф, состоящий из всех низкоуровневых графов, где $G_i = (U_i, V_i)$ – элемент графа, а i – номер подграфа, при $i = 0..n$

$U_{ij} = \{x, y\}$, $U_{ij} \in U$ – узел, x и y – координаты, j – номер узла подграфа i , при $j = 0..m$, U – множество узлов; $V_{ik} = \{U_s, U_e, l, tp, s\}$, $V_{ik} \in V$ – ребро; U_s – начальный узел; U_e – конечный узел; l – длина; tp – пропускная способность ребра; s – скорость движения по ребру, k – номер узла подграфа i , при $k = 0..h$.

$V_f = V \setminus (V_{ol} \cup V_{cl})$ – множество свободных ребер, где V_{ol} – множество перегруженных ребер и V_{cl} – критически загруженные ребра.

$U_f = U \setminus U_{ol}$ множество свободных вершин U_{ol} – узлы, находящиеся на перегруженных ребрах.

$G_f = (U_f, V_f)$ – свободный граф;

$\Omega_f = \bigcup_0^n G_{fi}$ – полный свободный граф;

$V_i^{lv} = \bigcup V_i$, $V_i \in E^{lv}$ – ребра;

Декомпозиция графа даёт возможность ускорить поиск маршрутов и разделить задачу на нахождения пути внутри города и между городами.

Использование СМТ даёт возможность определить перегруженные ребра (с очередями) или критически загруженные и реорганизовать транспортный поток, пересчитав маршрут в случае необходимости.

Опираясь на XML рекомендации представим множество ребер следующим образом:

```
<edge id=..., start_x=..., start_y=..., end_x=...,
end_y=..., length=..., tp=..., sp=.../>
<way id=..., name="..." length=...>
<edge id=.../>
<edge id=.../>
.....
<edge id=.../>
</way>
```

Тэг “edge” описывает ребра графа с характеристиками описанными выше.

Атрибуты start_x и start_y являются координатами начальной вершины; end_x и end_y – конечной. Атрибут “length” отвечает за длину ребра, “tp” – пропускную способность, “sp” – максимально допустимую скорость передвижения на ребре.

Следующий тэг “way” полезен для описания графа верхнего уровня, определяя ребро верхнего уровня через совокупность ребер нижнего уровня.

Отметим, что нахождение маршрута на графе верхнего уровня ничем не отличается от нахождения маршрута на графе нижнего.

Рациональное размещение датчиков для системы мониторинга транспорта

Проведя анализ существующих систем мониторинга и возможных вариантов их реализации, можно сделать вывод, что наиболее подходящий вариант построения системы основывается на использовании индуктивных датчиков. Возникает задача оптимального размещения датчиков на участке дорожного полотна. Она сводится к решению задачи размещения объектов [10], где решение основывается на максимизации эффективности функционирования датчиков при условии ограниченного объема денежных средств.

Данная задача в предлагаемой постановке приобретает следующий вид: необходимо максимизировать (1) при условиях (2) и (3).

$$A(x) = \sum_{ij} a_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

$$\sum_{ij} b_{ij} x_{ij} \leq B, \quad (2)$$

$$\sum_{ij} x_{ij} \leq D_j, \quad (3)$$

где a_{ij} – эффективность функционирования датчика; x_{ij} – наличие датчика в точке i на участке j , при $x_{ij} = 1$ (если датчик присутствует) и $x_{ij} = 0$ (в случае его отсутствия); b_{ij} – стоимость размещения датчика на участке; D_j – максимально возможное

количество объектов на участке; B – максимально возможные затраты.

Проведение исследования показало, что нет необходимости размещения СМТ на каждом ребре дорожного графа. Следовательно, размещать систему целесообразно на критически загруженных участках дороги. Монтирование датчиков в полотно происходит на начале ребра, для получения статистических данных по транспорту, въехавшему на отрезок, и на конце отрезка – для выехавшего транспорта в количестве пропорциональном возможной пропускной способности ребра.

Опираясь на экспертную оценку характеристик, описывающих дорожный участок, и на объем транспорта, находящегося на нём, можно реорганизовать поток так, чтобы избежать очередей на ребре.

Заключение

В работе была поставлена и решена задача оптимизации транспортных логистических потоков внутри города для нахождения маршрута между заранее заданными пунктами. Предложен алгоритм генерации ориентированных графов. Проведен анализ алгоритмов Дейкстры, Белман-Форд и Флойда-Уоршела. Сформулирована концепция декомпозиции графа для оптимизации поиска маршрута. Предложен вариант физического хранения построенного графа. Построена геоинформационная система и система мониторинга транспорта, основанная на индуктивных датчиках. Представленный подход можно использовать для оптимизации транспортных потоков в логистике.

Литература

1. *Automatic traffic monitoring from an airborne wide angle camera system [Electronic resource] //37th ISPRS congress, 2008: Proceedings. – Mode of access: WWW.URL: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/3b_pdf/105.pdf. – Last access: 2008. – Title from the screen.*
2. *Ahmed, Al-Kaisy. Development of Wireless Traffic Monitoring System for ITS Instruction and Research [Electronic resource] / Al-Kaisy Ahmed // University of Arizona. – Arizona, 2005. – 10 p. – Mode of access: <http://www.coe.montana.edu/ee/rwolff/4calkaisy.district62005paper.pdf> – 02.03.2014.*
3. *Левитин, А. В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ [Текст] : учеб. / А. В. Левитин. – М. : «Вильямс», 2006. – 576 с.*
4. *Алгоритмы: построение и анализ [Текст] : учебник / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – 2-е изд. – М. : «Вильямс», 2005. – 1292 с.*

5. Алгоритмы: построение и анализ [Текст] : учебник / Х. Томас, Т. Кормен, Ч. Лейзерсон и др. – М. : Вильямс, 2004. – 1152 с.

6. Рассел, С. Дж. Искусственный интеллект: современный подход [Текст] / С. Дж. Рассел, П. Норвиг. – 2-е изд. – М. : «Вильямс», 2006. – С. 157–162.

7. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования. [Текст] / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : Физматлит, 2003. – 432 с.

8. Хаусдорф, Ф. Теория множеств [Текст] / Ф. Хаусдорф ; под общ. ред. П. С. Александрова. – М. : ЛКИ, 2010. – 306 с.

9. Лавров, И. Задачи по теории множеств, математической логике и теории алгоритмов [Текст] / И. А. Лавров, Л. Л. Максимова. – М. : Физматлит, 2004. – 256 с.

10. Кондратьев, В. Д. Методы решения задачи размещения объектов обслуживания [Текст] / В. Д. Кондратьев // Управления большими системами : сб. науч. тр. ИУП РАН. – М. : ИУП РАН, 2008. – № 20. – С. 46-56.

Поступила в редакцию 04.03.2014, рассмотрена на редколлегии 11.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., профессор кафедры программной инженерии И. В. Шостак, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

А. В. Попов, М. В. Іванов

Поставлено і вирішено логістичну задачу оптимізації транспортних потоків усередині міста для знаходження маршруту між заздалегідь заданими пунктами. Побудовано алгоритм генерації орієнтованих графів для аналізу алгоритмів пошуку найкоротших маршрутів, який використовує пошук найближчих сусідів в двовимірній матриці. Розроблено метод декомпозиції графа. Запропоновано методіку для організації зберігання даних побудованого графа. Розроблено систему моніторингу транспорту, що використовує індуктивні датчики. Представлений підхід можна використовувати для оптимізації транспортних потоків в логістиці.

Ключові слова: логістика, транспортні потоки, алгоритм маршрутизації, геоінформаційна система, моніторинг транспорту.

INFORMATION TECHNOLOGY OF TRAFFIC FLOW OPTIMIZATION

A. V. Popov, M. V. Ivanov

Posed and solved the problem of optimizing the logistics of traffic flows within the city to find a route between predetermined points. Built- directed graphs generation algorithm to analyze shortest path algorithm using nearest neighbor search in a two-dimensional matrix. Developed a method for the decomposition of a graph. A technique for organizing the storage of this graph is proposed. A system for monitoring of transport, using inductive sensors is developed. The presented approach can be used to optimize traffic flow in logistics.

Keywords: logistics, transport streams, routing algorithm, GIS system, transport monitoring.

Попов Андрей Вячеславович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Іванов Михаил Валерьевич – аспирант каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: dronan13@gmail.com.